



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DAS RESPOSTAS DO TEC DURANTE TEMPESTADES
MAGNÉTICAS E HILDCAAs SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA**

Jaziel Felipe Braga Campelo

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelo Dr.
Clezio Marcos de Nardin e coorientada
pela Dra. Régia Pereira da Silva.

INPE
Natal, RN
2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DAS RESPOSTAS DO TEC DURANTE TEMPESTADES
MAGNÉTICAS E HILDCAAs SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA**

Jaziel Felipe Braga Campelo

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelo Dr.
Clezio Marcos de Nardin e coorientada
pela Dra. Régia Pereira da Silva.

INPE
Natal, RN
2021

Agradecimentos

Agradeço a Deus Pela vida e pela força que me concedeu para chegar até aqui.

Agradeço aos meus orientadores Dr. Clezio Marcos de Nardin e Dra. Régia Pereira da Silva pela amizade e empenho em buscar a excelência em todas as atividades que desenvolvemos.

Agradeço aos meus pais, Jailton Campelo e Helonei Campelo, e ao meu irmão, Jadiel Campelo, pelo apoio incondicional e palavras de carinho nos momentos certos.

Agradeço ao programa institucional de bolsas de iniciação científica PIBIC/INPE, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCTIC pelo fomento ao meu trabalho.

RESUMO

Tempestades geomagnéticas e HILDCAAs (do inglês, High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity) são distúrbios geomagnéticos que podem provocar alterações na ionosfera. Tais perturbações podem causar interferências em sinais de satélites que incluem os sistemas de navegação global resultando em erros de medições de distâncias e localização. Os níveis de distúrbios causados por esses eventos podem ser quantificados através do Conteúdo Eletrônico Total (TEC do inglês, Total Electron Content) ionosférico. Dessa forma, este trabalho visa compreender o comportamento do TEC em duas estações, uma na região equatorial, em São Luís - MA (2.59° S; 44.21° O), e outra em baixa latitude, Cachoeira Paulista – SP (22.68° S; 44.98° O), usando dados de GPS coletados ao longo de períodos selecionados durante a fase descendente do ciclo solar 24. A partir da elaboração e validação manual de um catálogo, foram selecionados oito eventos perturbados de diferentes intensidades, entre tempestades geomagnéticas e HILDCAAs. Os principais resultados encontrados mostram uma maior ocorrência de fases positivas no TEC perturbado em ambas estações, além de significativas variações no comportamento do TEC ao comparar as perturbações ocorridas no início e no final da fase descendente do ciclo solar.

Palavras-chave: tempestade geomagnética; HILDCAA; TEC.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. ROTAÇÃO DIFERENCIAL DO SOL.	2
FIGURA 2.2. MATÉRIA DE UM DESAPARECIMENTO DE UM FILAMENTO... 4	4
FIGURA 2.3. GRANDE BURACO CORONAL VISÍVEL NO SOL.....	5
FIGURA 2.4. ILUSTRAÇÃO DE HSS.....	6
FIGURA 2.5. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CIR.	7
FIGURA 2.6. REGIÕES DA MAGNETOSFERA.....	8
FIGURA 2.7. ILUSTRAÇÃO DA RECONEXÃO MAGNÉTICA.	10
FIGURA 2.8. CURVA DO ÍNDICE DST DE UMA TEMPESTADE MAGNÉTICA.	12
FIGURA 2.9. ESQUEMA DA IONIZAÇÃO DE UM ÁTOMO NEUTRO.....	13
FIGURA 2.10. ILUSTRAÇÃO DAS TRÊS REGIÕES DA IONOSFERA.....	15
FIGURA 2.11. TEC EM FUNÇÃO DA HORA LOCAL MAGNÉTICA.	17
FIGURA 3.1. OS DIFERENTES SEGMENTOS DO SISTEMA GPS.....	18
FIGURA 4.1. DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES DA RBMC.	20
FIGURA 4.2. LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE SÃO LUÍS E CACHOEIRA PAULISTA.	21
FIGURA 4.3. INTERFACE INICIAL DO PROGRAMA GPS-TEC ANALYSIS... 22	22
FIGURA 4.4. ARQUIVO DE SAÍDA DE EXTENÇÃO .CMN DO PROGRAMA GPS TEC ANALYSIS.....	23
FIGURA 4.5. ARQUIVO DE SAÍDA DE EXTENÇÃO .SDT DO PROGRAMA GPS TEC ANALYSIS.....	23
FIGURA 4.6. TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS CATALOGADAS.....	25
FIGURA 4.7. EVENTOS HILDCAAS CATALOGADAS.	26
FIGURA 5.1. VALORES DO ÍNDICE DST E TECU PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T1.	28
FIGURA 5.2. VALORES DO ÍNDICE DST E TECU PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T2.	29
FIGURA 5.3. VALORES DO ÍNDICE DST E DTEC PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T1.....	31
FIGURA 5.4. VALORES DO ÍNDICE DST E DTEC PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI.	32

FIGURA 5.5. VALORES DO ÍNDICE DST E TECU PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T3.	33
FIGURA 5.6. VALORES DO ÍNDICE DST E TECU PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T4.	34
FIGURA 5.7. VALORES DO ÍNDICE DST E DTEC PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T3.	35
FIGURA 5.8. VALORES DO ÍNDICE DST E DTEC PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI.	36
FIGURA 5.9. VALORES DO ÍNDICE DST E TECU PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T5.	37
FIGURA 5.10. VALORES DO ÍNDICE DST E TECU PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T6.	37
FIGURA 5.11. VALORES DO ÍNDICE DST E DTEC PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO T5.	39
FIGURA 5.12. VALORES DO ÍNDICE DST E DTEC PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI.	40
FIGURA 5.13. VALORES DO ÍNDICE DST E TECU PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO H1.	40
FIGURA 5.14. VALORES DO ÍNDICE DST E TECU PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO H2.	41
FIGURA 5.15. VALORES DO ÍNDICE DST E DTEC PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO H1.	43
FIGURA 5.16. VALORES DO ÍNDICE DST E DTEC PARA AS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI PARA O EVENTO H2.	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DE TEMPESTADES MAGNÉTICAS.....	12
TABELA 3.1. FREQUENCIAS DOS SINAIS L1 E L2 COMO MÚLTIPLO DE UMA FREQUENCIA FUNDAMENTAL.....	18
TABELA 4.1. EVENTOS SELECIONADOS PARA O ESTUDO.....	27

Sumário

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 O Sol, atividade solar e meio interplanetário	2
2.2. Magnetosfera e Atividade Geomagnética	7
2.3. DADOS DE ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA	10
2.3.1. ÍNDICES AURORAIS AE	10
2.3.2. ÍNDICE DST	11
2.4. TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS	11
2.5. IONOSFERA	13
2.6. CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL (TEC)	16
3. INSTRUMENTAÇÃO	17
3.1. CARACTERÍSTICAS DO SINAL GPS	18
4. METODOLOGIA	19
4.2. MONITORAMENTO DO TEC A PARTIR DOS DADOS DOS RECEPTORES DE GPS TEC	19
4.2. GPS-TEC ANALYSIS VERSION 3	22
4.3. CATALOGO DE TEMPESTADES MAGNÉTICAS E HILDCAAS	24
4.4. SELEÇÃO DOS EVENTOS PARA ESTUDO	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1. TEMPESTADES FRACAS	28
5.2. TEMPESTADES MODERADAS	34
5.3. TEMPESTADES INTENSAS	37
5.4. HILDCAAs	41
6. CONCLUSÃO E ESTUDOS FUTUROS	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Neste relatório final serão apresentadas as atividades desenvolvidas durante o período de setembro de 2020 até agosto de 2021. Neste período foram desenvolvidas atividades que estão de acordo com o plano de trabalho. As atividades teóricas realizadas foram: uma revisão bibliográfica sobre temas relacionados ao Sol, meio interplanetário, ionosfera, magnetosfera e instrumentação. As atividades práticas realizadas foram: Elaboração de programas para a catalogação de todos os eventos HILDCAAs e tempestades geomagnéticas que ocorreram durante a fase descendente do ciclo solar 24; cálculo do TEC utilizando o GPS TEC analysis para as estações de Cachoeira Paulista e São Luís; redação de textos científicos como resumos e relatórios e participação em reuniões técnico-científicas virtuais.

No capítulo 2 deste relatório é realizada uma revisão dos principais conceitos e fenômenos ligados à pesquisa que foi desenvolvida. A revisão tem início descrevendo-se algumas características do Sol e da atividade solar, prossegue-se para as condições do meio interplanetário e alguns fenômenos que ali ocorrem. Depois é dada uma visão geral sobre a magnetosfera terrestre juntamente com alguns pequenos comentários e observações acerca dos índices de atividade geomagnética que são usados neste relatório para, logo em seguida, apresentar as principais características das tempestades geomagnéticas e HILDCAAs. Seguidamente, é discutida a formação e divisão da Ionosfera para, por último, abordar o Conteúdo Eletrônico Total (TEC) como parâmetro que avalia o comportamento da Ionosfera.

Nos capítulos 3 e 4 são apresentadas a instrumentação e a metodologia empregadas, respectivamente. No capítulo 5 são apresentados os resultados e, no capítulo 6, é feita a discussão dos resultados. Por último, são mostrados o capítulo de conclusão e as referências bibliográficas.

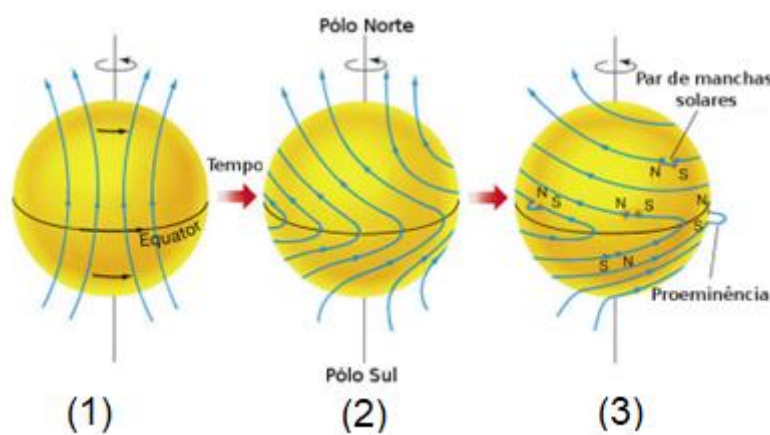
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Sol, atividade solar e meio interplanetário

Devido às altas temperaturas do Sol toda a matéria que o constitui está na forma de gás e plasma, o que, diferentemente do que ocorre em corpos rígidos, permite o seu movimento de rotação diferencial, que é mais rápido ao se aproximar do seu equador, diferença essa que pode chegar a 10 dias. A diferença na rotação para latitudes distintas é um dos principais motivos do campo magnético do Sol ser instável e complexo.

A Figura 2.1 mostra a formação de uma proeminência que ocorre devido a essa complexa relação entre campo magnético do Sol e sua rotação diferencial. Na Figura: (1) O Sol apresenta um campo com direção azimutal (do polo Norte ao Sul), e não possui uma rotação uniforme. (2) Por causa da rotação não uniforme, as linhas de campo começam a se contorcer na direção meridional e formam uma componente toroidal do campo. (3) Quando esta componente toroidal é suficientemente intensa, os campos magnéticos, ao atravessar a fotosfera solar, geram as manchas solares que compõem as regiões ativas.

Figura 2.1. Rotação diferencial do Sol.



Fonte: adaptado de Bennett et al., (2013).

A formação desses pequenos campos magnéticos, devido à rotação diferencial do Sol, é tão intensa que é responsável por dificultar a locomoção da matéria entre suas linhas de campo fazendo com que essas regiões esfriem. Essa diminuição de temperatura pode ser percebida visivelmente como pontos ou regiões mais escuras, formando manchas na superfície solar, que ocorrem sempre aos pares caracterizando o polo sul e o polo norte do campo em que elas se localizam. Esse fenômeno é chamado de manchas solares e são encontradas majoritariamente quando o campo magnético do Sol está conturbado.

A relação rotação diferencial do Sol e campo magnético modifica e influencia continuamente o que chamamos de Atividade Solar. A atividade solar é o resultado de um conjunto de perturbações da atmosfera solar cuja ocorrência varia, principalmente, em decorrência do chamado ciclo de atividade solar com o período de aproximadamente 11 anos, medido pelo número de manchas solares, que, além de serem regiões mais escuras que a superfície visível solar, possuem um intenso campo magnético. Associados a esse forte fluxo estão as regiões ativas, onde ocasionalmente ocorrem explosões solares e proeminências (grandes filamentos de matéria Solar e campo magnético, formando arcos) (ESTRELA, 2017).

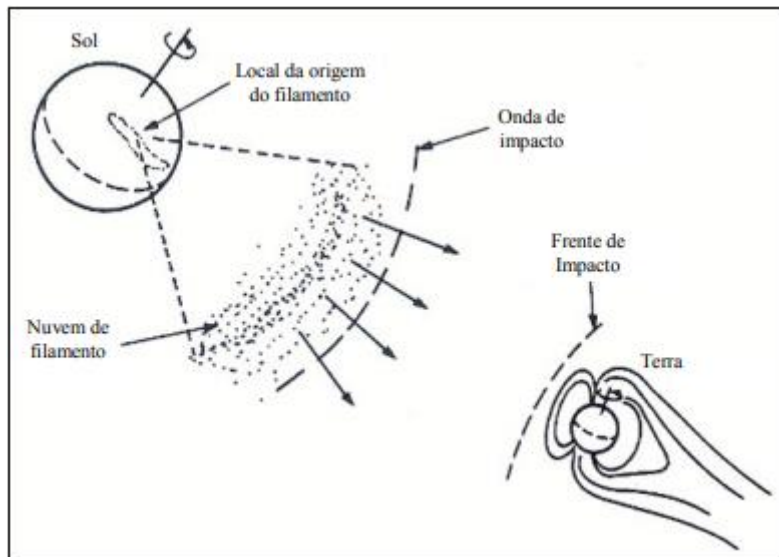
O ciclo solar pode ser dividido em 4 partes: fase ascendente (que dura aproximadamente 4 anos); fase de máxima atividade solar; fase descendente (que dura aproximadamente 5-6 anos); fase de mínima atividade solar (TAKUCHEV, 2010).

Em regiões de manchas solares as condições encontradas fazem com que grandes filamentos da matéria solar sejam projetados sobre a sua superfície, acompanhando as linhas do campo magnético, formando um arco, como podemos ver na Figura 2.1. Esse fenômeno é chamado proeminência. (ESTRELA, 2017).

Essas proeminências podem ser estáveis, chegando a durar meses, como podem subitamente causar uma erupção (Solar Flare) e expelir material solar em direção ao espaço interplanetário. A Figura 2.2 mostra a nuvem de matéria sendo lançada pelo Sol em direção a Terra, se esse material lançado atingir o

planeta pode afetar o campo magnético terrestre intensamente. (POZ, 2010).

Figura 2.2. Matéria de um desaparecimento de um filamento.



Fonte: POZ (2010).

Outro fenômeno Solar importante são as ejeções de massa coronal (CME), onde uma súbita ejeção de plasma e campo magnético são lançados para fora da coroa solar. As CMEs têm a capacidade de gerar um forte impacto sobre as condições geomagnéticas caso atinja a Terra, principalmente quando possuem a configuração de campo adequada, causando grandes tempestades geomagnéticas.

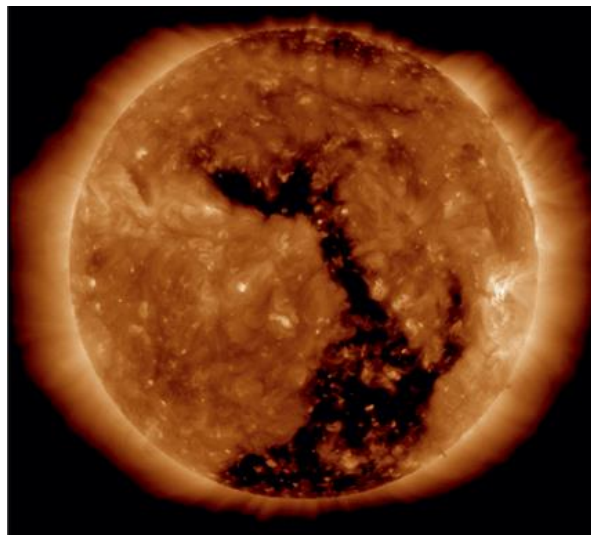
Quando as CMEs ocorrem, os parâmetros característicos do vento solar são modificados abruptamente, sua densidade pode passar de 10^6 partículas/ m^3 para 10^7 partículas/ m^3 e sua velocidade de 300-400 km/s para valores próximos a 1000 km/s (SALOMONI et al., 2003).

O vento solar e o campo magnético interplanetário (IMF) podem interagir com o campo magnético terrestre. Perturbações no campo magnético interplanetário (IMF) podem ser o resultado de fenômenos que têm origem na atividade solar como: buracos coronais, explosões solares e CMEs, cujas frequências estão diretamente relacionadas à fase do ciclo solar correspondente (GONZALEZ et

al., 1999).

Os buracos coronais abrangem amplas regiões da coroa solar caracterizadas pela densidade baixa do plasma e uma região onde as linhas de campo abrem-se para o espaço. Os buracos coronais são grandes e muito estáveis próximo aos polos solares, e são fontes do vento solar de alta velocidade, com ventos que podem chegar a 800 Km/s. A Figura 2.3 mostra um exemplo de um grande buraco coronal formado em latitude alta e que atravessa o equador do Sol visto com filtro de raios-x.

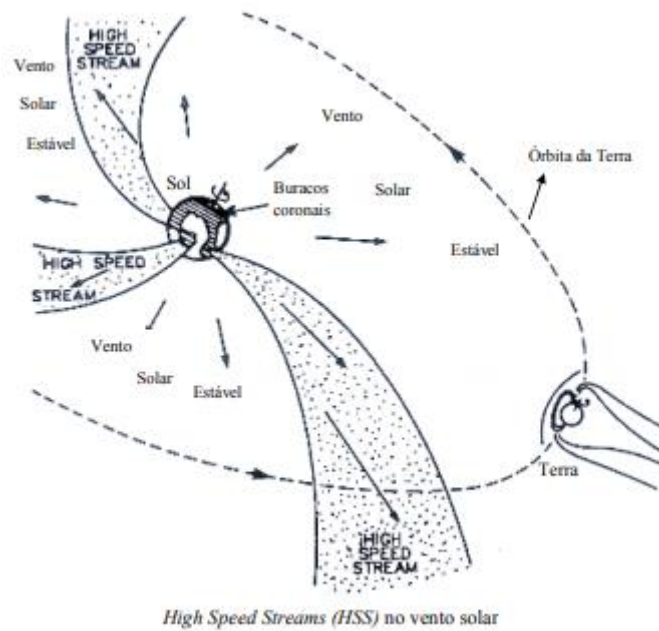
Figura 2.3. Grande buraco coronal visível no Sol.



Fonte: Adaptado de Strong (2017).

Durante o mínimo solar é comum existirem grandes buracos coronais concentrados nas regiões polares. Com o progresso do ciclo solar, os buracos coronais polares tendem a ser menores e buracos coronais de latitude mais baixas começam a aparecer. A existência de buracos coronais coincide com a detecção de feixes de altas velocidades no vento solar (HSS do inglês High Speed Stream), e distúrbios geomagnéticos recorrentes produzidos por eles sobre a Terra. A Figura 2.4 apresenta uma ilustração de um HSS.

Figura 2.4. Ilustração de HSS.

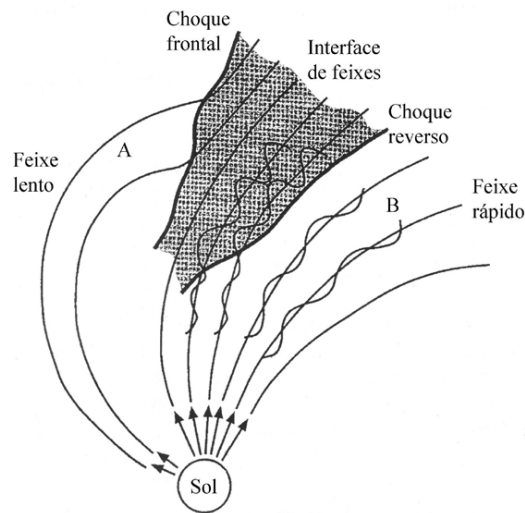


Fonte: Adaptado de McNamara (1991).

De acordo com a Figura 2.4, é possível constatar que a matéria ejetada pelo HSS, tendo origem em buracos coronais, flui radialmente, devido a rotação do Sol, que resulta em um fluxo de matéria na forma de uma espiral.

Fluxos de plasma de diferentes velocidades que são emitidos radialmente do Sol podem interagir entre si de modo que, a uma certa distância, esses fluxos podem colidir em suas trajetórias. Essa estrutura é chamada de Região de Interação Corrotante ou Corotating Interaction Region (CIR). A Figura 2.5 mostra um diagrama de como é formada uma CIR e os choques que ocorrem em suas interfaces.

Figura 2.5. Representação esquemática de uma CIR.



Fonte: Adaptado de GONZALEZ et al (1999).

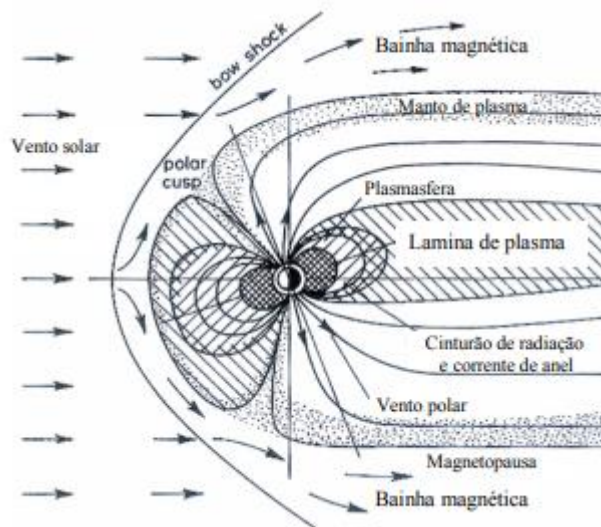
Na frente do feixe que possui maior velocidade, onde ele interage com o fluxo lento (A), representada à frente da região hachurada, ocorre a formação do choque frontal. Atrás da região hachurada, na interface com o fluxo de alta velocidade (B), ocorre o choque reverso. É importante ressaltar que as CIRs mesmo não estando perfeitamente desenvolvidas na órbita terrestre, elas ainda são capazes de provocar subtempestades e tempestades magnéticas (TSURUTANI et al., 2006).

2.2. Magnetosfera e Atividade Geomagnética

O formato característico da magnetosfera, parecido com o formato de um cometa, é o resultado da interação entre o campo magnético da Terra e o vento solar. A Figura 2.6 mostra como o campo magnético terrestre é comprimido no lado diurno e alongado no lado noturno. O lado da magnetosfera da Terra voltado para o Sol recebe uma frente de impacto (bow shock) do vento solar que ocorre a aproximadamente 10 raios terrestres de distância da Terra, já o lado da magnetosfera oposto ao Sol, chamada de calda geomagnética, se estende até algumas centenas de milhares de quilômetros (COSTA, 2011; GONZALEZ

et al., 1994).

Figura 2.6. Regiões da magnetosfera.



Fonte: Adaptada de Davies (1990).

Ao se chocar com a magnetosfera, o vento solar é abruptamente desacelerado e aquecido e é desviado para uma região ao redor da Terra denominada de bainha magnética. Assim, a região da bainha magnética é a região do espaço entre o vento solar e a magnetopausa na Figura 2.6 (COSTA, 2011).

Abaixo da região da bainha magnética, está a plasmasfera, que contém plasma relativamente frio com alta densidade que tem sua origem na ionosfera terrestre. O plasma nesta região corrotaciona com a Terra, mas ele também pode fluir ao longo das linhas de campo geomagnético de um hemisfério a outro. (COSTA, 2011; SERRA, 2012).

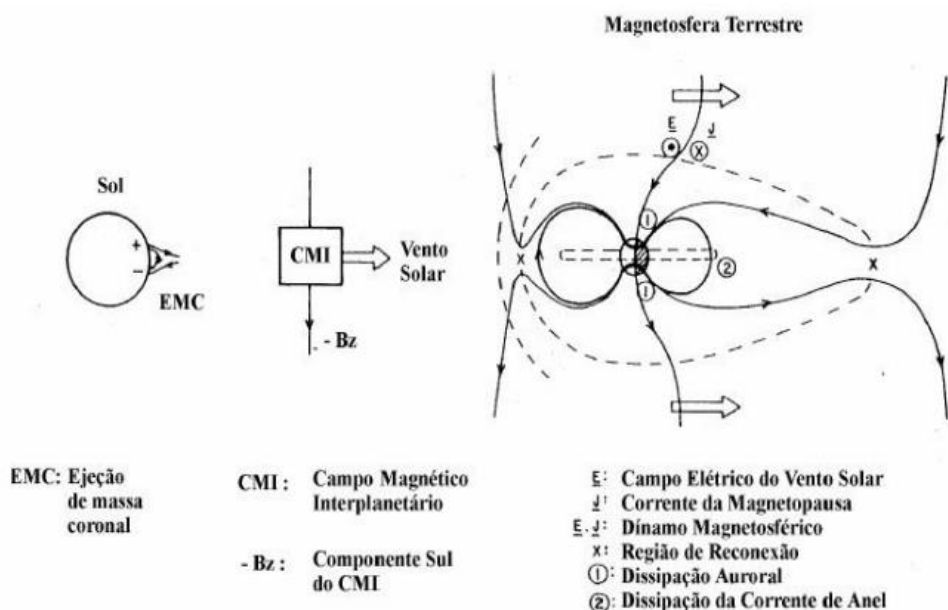
A deflexão gerada pela bainha magnética não é capaz de desviar todas as partículas, por isso parte das partículas do vento solar ainda conseguem atravessá-la. Também existem regiões chamadas de Cúspides polares (polar cusp) em que a geometria das linhas de campo leva a uma configuração divergente, com a geometria perpendicular, o que possibilita a entrada de partículas do vento solar na magnetosfera. (SERRA, 2012).

Uma outra forma das partículas adentrarem na magnetosfera é através de sua

calda. Essas partículas são transferidas para a cauda, onde se forma uma região conhecida como lâmina de plasma. As partículas da lâmina de plasma estão relativamente livres para se locomover, assim, tem acesso direto a atmosfera superior no lado noturno ao longo das linhas de campo geomagnético. As partículas energéticas próximas do centro da lâmina de plasma se direcionam mais perto da Terra devido a ação de campos elétricos e magnetosféricos e então ficam “aprisionadas” nas linhas de campo magnético fechadas e mais intensas, formando, em decorrência disso, o cinturão de radiação de Van-Allen. Essas partículas altamente energizadas formam uma espécie de espiral na medida em que se movem ao longo das linhas de campo geomagnético fechadas em direção a Terra. Essas partículas que são aprisionadas pelo cinturão de radiação podem ser conduzidas para formar a corrente de anel. Esta corrente de anel que rodeia a Terra tem papel fundamental para ocorrências da fase principal da tempestade geomagnética (SERRA, 2012; DUTRA et al., 2020).

A transferência de energia do vento solar para a magnetosfera ocorre por um processo de reconexão magnética. Se a componente Z do campo magnético do meio interplanetário estiver na direção Sul, as linhas do campo magnético interplanetário se conectam com as linhas do campo geomagnético voltadas para o lado diurno. Na região da cauda acontece uma nova reconexão, de modo que as partículas são injetadas em órbitas próximas da Terra. A Figura 2.7 mostra um diagrama esquemático do processo de reconexão, através do qual energia e partículas são transferidas do vento solar para a magnetosfera (GONZALEZ et al., 1994).

Figura 2.7. Ilustração da reconexão magnética.



Fonte: Adaptada de Tsurutani e Gonzalez (1999).

2.3. DADOS DE ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA

Através de equipamentos adequados se pode apurar os efeitos das interações entre o vento solar e a magnetosfera usando índices geomagnéticos, concebidos para representar o nível de perturbação da magnetosfera da Terra. Esses índices são responsáveis por facilitarem a interpretação dos dados fornecidos por magnetômetros (ROSTOKER, 1972).

2.3.1. ÍNDICES AURORAIS AE

O índice AE é o índice que mede o comportamento do eletrojato auroral (Auroral Electrojet) e é obtido em intervalos de 1 minuto a partir das variações na componente horizontal do campo geomagnético medido por 10 ou 13 observatórios localizados ao longo da zona auroral do hemisfério norte (o número de estações depende do período que está sendo analisado). Como o campo magnético sempre possui flutuações em sua intensidade, é necessário normalizar

os dados, para isso é calculado um valor base, para um dado observatório, sobre os cinco dias mais quietos do ano (SERRA, 2012).

Apesar da ampla utilização do índice AE, existe um problema com a utilização desse índice: a distribuição não uniforme dos observatórios em torno da zona auroral. Essa má distribuição acaba por subestimar grandes perturbações na magnetosfera que ocorrem longe dos observatórios (ROSTOKER, 1972)

2.3.2. ÍNDICE DST

O índice Dst (Disturbance Storm Time) tem a finalidade de representar o campo perturbado e possui uma resolução horária. As principais perturbações no Dst são negativas, interpretados como decréscimos no campo magnético. O índice Dst possui como finalidade monitorar a variação da corrente de anel. Essa corrente é sensível à ocorrência de tempestades magnéticas. Na derivação do índice Dst são utilizados quatro observatórios magnéticos: Honolulu, San Juan, Hermanus e Kakioka. (ROSTOKER, 1972)

Também são possíveis variações positivas no Dst que são principalmente causadas pela compressão em frente à magnetosfera devido aos aumentos na pressão ocasionados pela variação na velocidade do vento solar que se choca com o campo magnético terrestre (SERRA, 2012).

2.4. TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

As tempestades geomagnéticas foram denominadas como as perturbações que apresentavam grande decréscimo da componente horizontal do campo da Terra (TSURUTANI E GONZALEZ, 1997; ROSTOKER, 1972). A intensidade da tempestade magnética pode ser definida pelo menor valor atingido no índice Dst. A Tabela 2.1 mostra a classificação do tipo de tempestade magnética de acordo com o estabelecido em GONZALES et al., (1994).

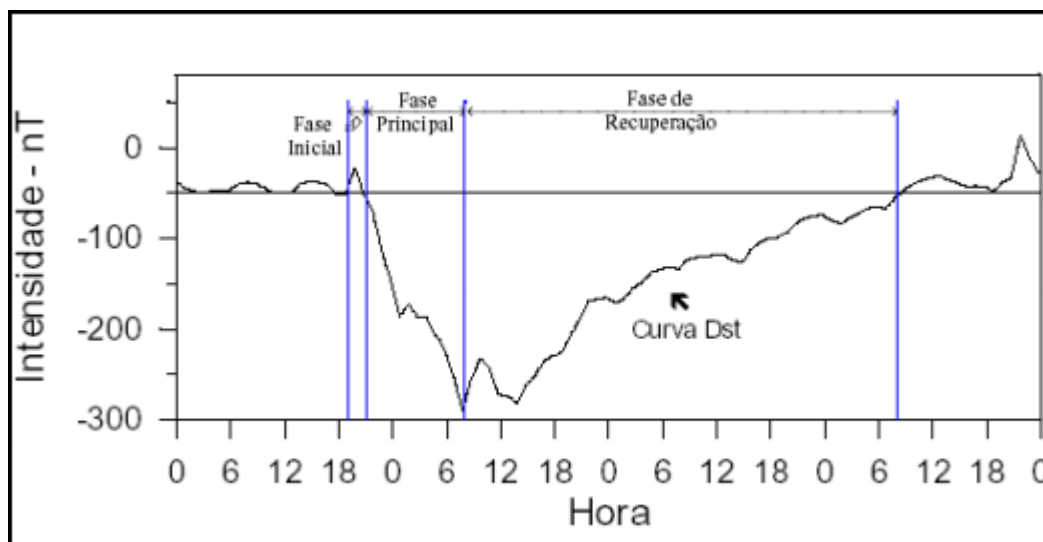
Tabela 2.1. Classificação da intensidade de tempestades magnéticas.

Intensidade da tempestade	Dst (nT)
Muito intensa	<-250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a -100
Fraca	-30 a -50

Fonte: (GONZALES et al., 1994)

A Figura 2.8 mostra um gráfico do índice Dst indicando as três fases de uma tempestade geomagnética: a fase inicial ou início súbito (Storm Sudden Commencement - SSC), a fase principal e a fase de recuperação. O início súbito, caracterizado pelo índice Dst positivo, não é uma condição necessária para a ocorrência de uma tempestade.

Figura 2.8. Curva do índice Dst de uma Tempestade magnética.



Fonte: adaptado de Yamashita (1999)

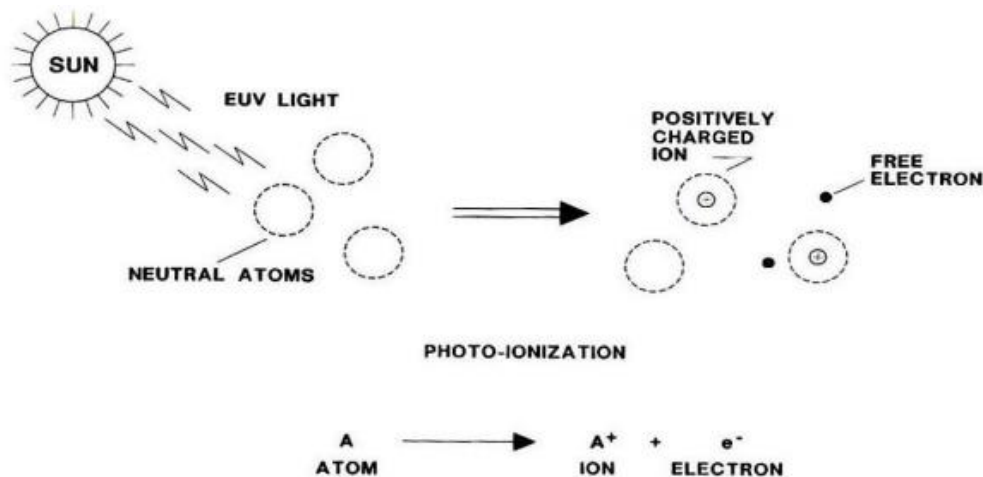
2.5. IONOSFERA

A ionosfera terrestre é uma região da atmosfera que se situa a 50 km de altitude e se estende até 1000 km, aproximadamente. Esta região é formada pela fotoionização das moléculas e átomos que absorvem fótons provindos do Sol e acabam por se ionizar. Esse processo é o responsável por gerar um plasma frio que circunda a Terra, onde existem grandes quantidades de íons e elétrons.

A ionosfera é a região ionizada da alta atmosfera. A principal fonte de plasma é a fotoionização das moléculas neutras por extremo ultravioleta (EUV), e raios X.

O fenômeno da fotoionização ionosférica é ilustrado na Figura 2.9. Nessa figura é mostrada que quando a energia de um fóton incidente sobre o elemento neutro é maior do que o seu potencial de fotoionização, acontece a liberação de elétrons deste elemento, originando um íon positivo e elétrons livres.

Figura 2.9. Esquema da ionização de um átomo neutro.



Fonte: McNamara (1994)

Além do processo da fotoionização, também é possível gerar elétrons e íons livres em uma proporção menor pelo processo de ionização corpuscular (ou secundária). Esse processo ocorre pelo choque de partículas energéticas car-

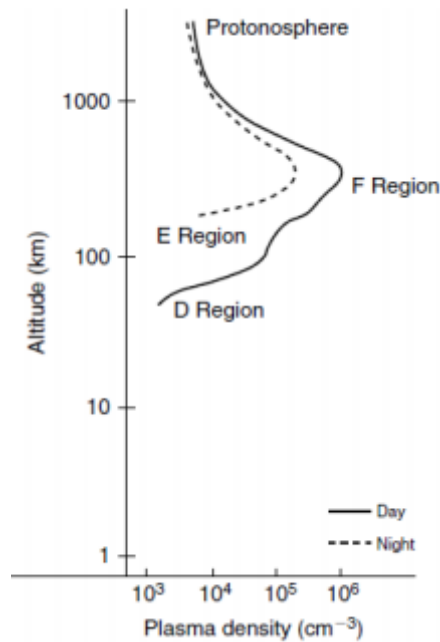
regadas provindas do Sol através do vento solar ou provindas do meio galáctico por meio dos raios cósmicos ao colidirem com as partículas neutras da atmosfera. (SILVA, 2013; MATSUOKA, 2007).

O principal processo de perda da ionosfera é a recombinação. Existem dois tipos de mecanismos pelos quais a recombinação pode ocorrer: a recombinação radiativa, em que os elétrons se ligam diretamente a íons de cargas positivas resultando em átomos neutros, e a recombinação dissociativa, em que os elétrons se ligam diretamente a moléculas carregadas positivamente separando cada molécula carregada positivamente em duas outras moléculas neutras. Na parte mais baixa da ionosfera, elétrons são perdidos por um terceiro processo chamado de processo de junção (ou attachment), no qual elétrons ligam-se a átomos neutros resultando em íons de carga negativa (MATSUOKA, 2007).

Considerando esses processos de produção e perda de elétrons livres e íons, com o avanço da radiação solar a atmosfera vai ficando mais densa de modo que a produção de elétrons aumenta até um nível onde a densidade de elétrons é a maior possível.

A ionosfera pode ser dividida em três regiões, D, E e F, de acordo com a densidade de plasma, como mostrado na Figura 2.10. O comportamento e as características do plasma ionosférico são controlados através dos processos de produção (fotoionização) e perda (recombinação) de elétrons livres (JUAREZ, 2019).

Figura 2.10. Ilustração das três regiões da Ionosfera.



Fonte: Adaptade de Kelley (2009)

A região D, a mais próxima da superfície da Terra, está entre 50 a 90 km e apresenta densidade eletrônica muito menor que a densidade de partículas neutras pelo fato da frequência de colisões entre os constituintes da região D ser elevada. A camada D é afetada pela presença da radiação Solar fazendo com que à noite a densidade caia drasticamente ou até mesmo desapareça. Nessa região a recombinação ocorre em grande escala quando comparado com o efeito de ionização (MATSUOKA, 2007).

A região E se estende em uma faixa de altura que vai de 90 km até 150 km, e é a região da maior condutividade elétrica da ionosfera, portanto, nela se desenvolvem correntes ionosféricas. O comportamento dessa camada ionosférica é praticamente dependente da radiação solar, por isso, durante a noite, a região E tende a desaparecer devido a sua fonte primária de ionização não estar mais presente (SILVA, 2013).

A região F está localizada entre 150 km e 1000 km, e a frequência de colisão entre os constituintes dessa região é baixa devido a baixa concentração de constituintes. Durante o dia, a região F é dividida em duas camadas, a F1 que

é a camada inferior e a F2 que é a camada superior, durante a noite a região F é uma camada única formada apenas pela camada F2. A camada F2 é a mais dinâmica e mais densa da ionosfera, está localizada em uma faixa de altura que vai de 250 até 1000 km de altitude, embora essa altura possa variar dependendo das condições geofísicas (SILVA, 2013; MATSUOKA, 2007).

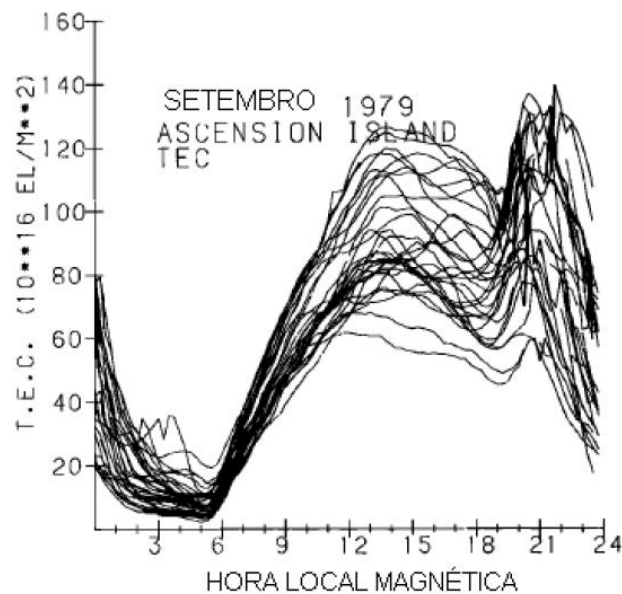
2.6. CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL (TEC)

O comportamento ionosférico pode ser avaliado a partir da determinação do Conteúdo Eletrônico Total ou TEC (do inglês, *Total Electron Content*). O TEC é um parâmetro que representa a quantidade de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde a superfície da Terra até uma determinada altura na atmosfera. A unidade de medida desse parâmetro ionosférico é dada em unidades de TEC (Total Electron Content Unit – TECU), onde 1 TECU corresponde a 1×10^{16} elétrons/m² (MATSUOKA, 2007; NEGRETI, 2012).

O TEC varia consideravelmente em função da radiação solar ionizante, por isso, o TEC depende de parâmetros como variações diurnas, variações sazonais, localização geográfica, variações relacionadas ao nível de atividade solar, variações de temperatura e da composição da atmosfera neutra, entre outros fatores (SILVA et al., 2020; MATSUOKA, 2007).

De uma maneira geral, o TEC apresenta um pico durante o período diurno e um valor de mínimo antes do amanhecer, sendo que, em médias e baixas latitudes, ainda é possível observar um segundo máximo logo após o pôr do Sol, como mostra a Figura 2.11 (MATSUOKA, 2007; NEGRETI, 2012).

Figura 2.11. TEC em função da hora local magnética.



Fonte: Adaptado de Anderson e Klobuchar (1983).

3. INSTRUMENTAÇÃO

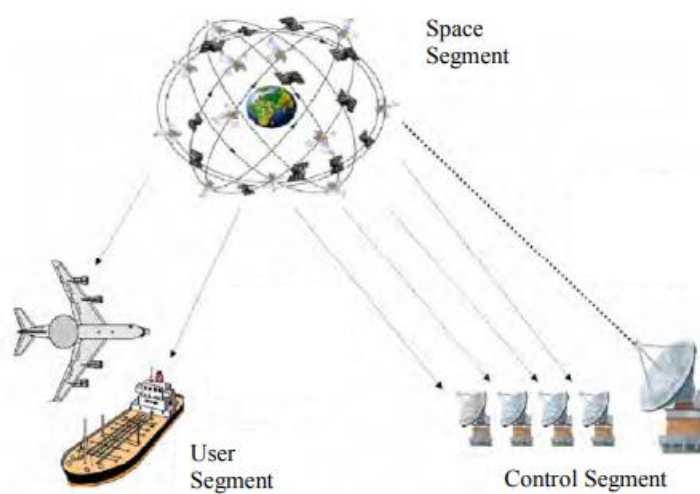
Dentre os muitos satélites que orbitam nosso planeta e fornecem dados sobre a geolocalização de um ponto sobre a Terra, destaca-se o Sistema de Navegação por Satélite (ou Global Navigation Satellite System, GNSS). Essa constelação de satélites emite sinais de navegação que, dentro de certa margem de erro, permitem determinar a posição de um receptor (latitude, longitude e altura) baseando-se na distância calculada do receptor até cada observável. O GNSS atualmente é composto pelos sistemas americano (Global Positioning System - GPS), europeu (Galileo), russo (Glonass) e chinês (Beidou). (JONAH, 2013; CARMO, 2018).

Dos conjuntos de satélites que compõem o GNSS citados anteriormente, o GPS foi o primeiro sistema desenvolvido e é o que possui uma maior quantidade de satélites em operação.

A Figura 3.1 mostra que o sistema GPS é formado por três segmentos: o segmento espacial (conjunto de satélites), o segmento de controle (responsável pelo controle dos satélites) e o segmento do usuário (receptor do sinal). O

segmento espacial é formado por um mínimo de 24 satélites equidistantes que orbitam a Terra com altitude de 20200 km e período de 12 horas. A disposição de cada uma das orbitas dos satélites é feita de modo a garantir que ao menos 4 satélites possam ser visualizados em qualquer lugar da superfície da Terra, em qualquer momento. Um quarto satélite se faz necessário para correção temporal (Monico, 2008).

Figura 3.1. Os diferentes segmentos do sistema GPS.



Fonte: (JONAH, 2013)

3.1. CARACTERÍSTICAS DO SINAL GPS

Todos os satélites da constelação GPS possuem como característica fundamental emitirem o mesmo sinal de rádio com frequências iguais. Uma vez que as frequências emitidas são as mesmas, o que permite a identificação de cada satélite é a diferença na sequência de códigos dos sinais emitidos. Cada satélite GPS emite o seu sinal a partir de uma mesma frequência fundamental de 10,23 MHz, dessa forma, portadoras designadas de L1 e L2 são responsáveis por transmitir ondas de rádio na frequência de 1,57542 GHz para a portadora L1 e 1,2276 GHz para a portadora L2, de modo que a portadora L1 é 154 vezes a frequência fundamental e a portadora L2 é 120 vezes a frequência fundamental (MONICO, 2000). A Tabela 3.1 resume as informações contidas acima:

Tabela 3.1. Frequências dos sinais L1 e L2 como múltiplo de uma frequência fundamental.

Frequência fundamental	L1	L2
10,23 MHz	$10,23 \text{ MHz} \times 154$ $= 1,57542 \text{ GHz}$	$10,23 \text{ MHz} \times 120$ $= 1,2276 \text{ GHz}$

Fonte: (MONICO, 2000).

A utilização de duas frequências distintas pelos satélites, L1 e L2, permite a correção de erro do sistema GPS devido a refração ionosférica (MONICO, 2000).

4. METODOLOGIA

4.2. MONITORAMENTO DO TEC A PARTIR DOS DADOS DOS RECEPTORES DE GPS TEC

A grande utilização de receptores GPS para estudo do TEC vem do baixo custo de implementação e manutenção das estações ao mesmo tempo em que é possível a realização da medição do TEC de 6 a 12 satélites ao mesmo tempo (SEEMALA, 2011).

No caso do Brasil existe a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), que é operada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) desde dezembro de 1996. Hoje, o RBMC, conta com 127 estações operantes, 19 estações inoperantes e 4 estações em estado de advertência, totalizando 150 Estações sem contar as estações inativas (IBGE, 2021b). Os dados de GPS do RBMC são fornecidos em um formato padrão denominado Receiver Independent Exchange (RINEX). O formato RINEX é um conjunto de definições

padrão para dados de GPS, elaborado pelo Instituto Astronômico da Universidade de Berna de maneira que seja independente dos diferentes fabricantes de receptores para facilitar o processamento dos dados obtidos em diferentes tipos de receptores (MUELLA, 2008). Dependendo da estação utilizada no estudo, é possível que o receptor registre dados com uma visualização praticamente contínua do comportamento do plasma ionosférico. (IBGE, 2021a)

A Figura 4.1 mostra a distribuição mais recente da rede de receptores de GPS operadas pelo IBGE. Os dados estão disponíveis em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuodos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>. Na Figura 4.1, as cores em vermelho simbolizam as estações inoperantes, as cores em amarelo simbolizam as estações em estado de advertência e as cores em verde simbolizam as estações operantes. As estações são classificadas como inoperantes quando ficam sem emitir dados há mais de 6 dias, já as estações classificadas em estado de advertência passaram por uma atualização de hardware (geralmente atualização de antena ou receptor) e as estações operantes enviam dados normalmente.

Figura 4.1. Distribuição das estações da RBMC.



Fonte: (IBGE, 2021b)

Neste trabalho foram escolhidas duas estações para o estudo do TEC , uma situada em nível da latitude equatorial e outra situada em nível de baixa latitude, as duas estações estão destacadas na Figura 4.2. A estação equatorial fica em São Luís, chamada SALU, possuindo - 02° 35' 36,45410" de latitude, - 44° 12' 44,92406" de longitude e 18,984 m de altitude. A estação de Cachoeira Paulista foi a escolhida para analisar a ionosfera de baixa latitude, chamada de CHPI, possuindo - 22° 41' 13,72659" de latitude, - 44° 59' 6,56989" de longitude e 617,415 m de altitude.

Figura 4.2. Localização das estações de São Luís e Cachoeira Paulista.



Fonte: (IBGE, 2021b)

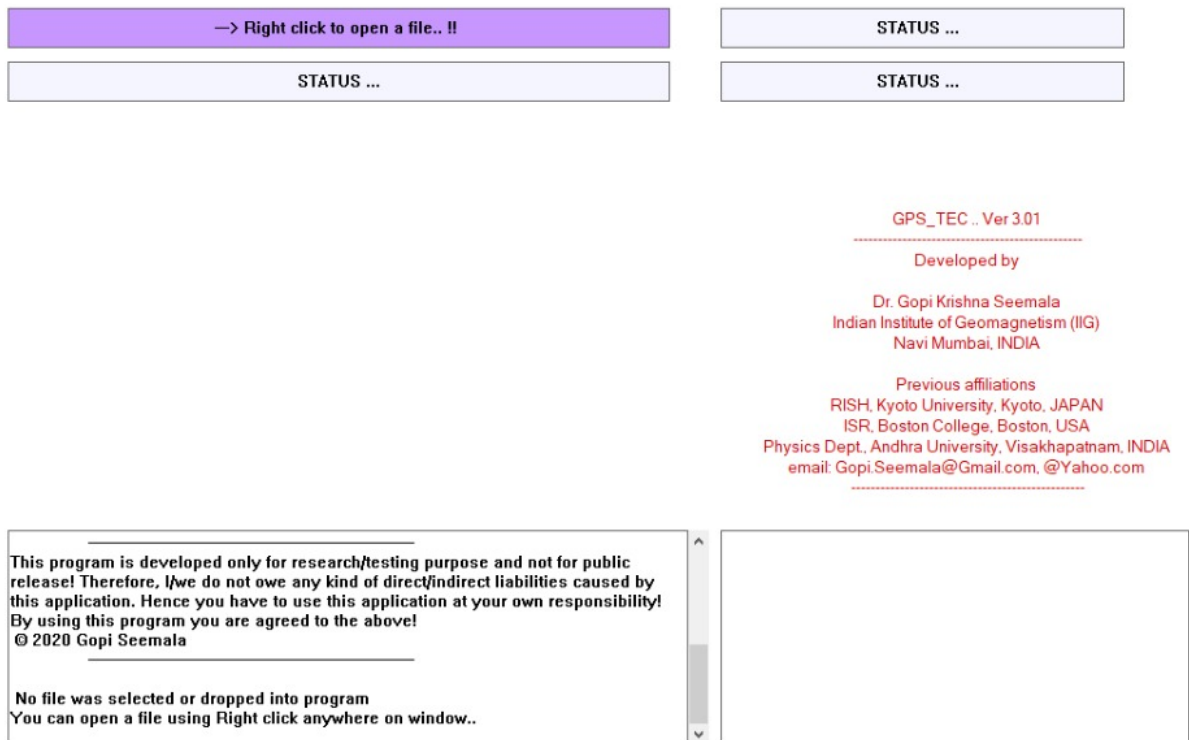
Após a obtenção dos dados RINEX de ambas as estações referente ao dia requerido, calcula-se o TEC fazendo-se uso do programa GPS-TEC Analysis version 3.

4.2. GPS-TEC ANALYSIS VERSION 3

A partir dos arquivos RINEX adquiridos através da RBMC, o cálculo do TEC foi realizado utilizando-se o programa GPS-TEC Analysis version 3, terceira versão do GPS-TEC program, também conhecido como Gopi Seemala por ter sido desenvolvido pelo Doutor Gopi Krishna Seemala e disponibilizado por ele através do site: <https://seemala.blogspot.com/>.

A Figura 4.3 mostra a interface inicial do programa pronto para receber os arquivos RINEX como input.

Figura 4.3. Interface inicial do programa GPS-TEC Analysis.



Fonte: Produção do autor

Dentre as possibilidades de uso da terceira versão do GPS-TEC destacamos a capacidade de calcular o TEC a partir dos dados de observação do GPS RINEX como input de dados e a elaboração dos valores de TEC verticais em imagens, além da criação de arquivos de saída ASCII (* .Cmn e * .Std) em qualquer diretório do arquivo de dados que se queira.

O arquivo de saída de extensão .Cmn é mostrado na Figura 4.4 e possui algumas informações importantes. No cabeçalho é indicado o código da estação bem como a latitude, longitude e altitude da estação. O código "chpi" significa a estação de Cachoeira Paulista, por exemplo. As colunas informam, por ordem, data em formato juliano fracionado, tempo em UTC fracionado, o número de identificação PRN, o ângulo de azimute, o ângulo de elevação, latitude e longitude, sTEC e vTEC.

Figura 4.4. Arquivo de saída de extensão .Cmn do programa GPS TEC Analysis.

```

chpi, Brazil
-22.68715 315.01484 617.41015

MJdatet Time PRN Az Ele Lat Lon Stec Vtec S4
56661.136458 3.275000 1 225.17 5.11 -32.189 303.219 48.81 15.11 -99.000
56661.136632 3.279167 1 225.12 5.19 -32.162 303.282 48.78 15.12 -99.000
56661.136806 3.283333 1 225.07 5.27 -32.134 303.345 48.70 15.11 -99.000
56661.136979 3.287500 1 225.01 5.35 -32.107 303.407 48.86 15.18 -99.000
56661.137153 3.291667 1 224.96 5.43 -32.079 303.470 48.88 15.21 -99.000
56661.137326 3.295833 1 224.91 5.51 -32.052 303.531 48.92 15.24 -99.000
56661.137500 3.300000 1 224.86 5.59 -32.024 303.593 48.92 15.25 -99.000
56661.137674 3.304167 1 224.81 5.67 -31.996 303.654 48.95 15.28 -99.000
56661.137847 3.308333 1 224.76 5.75 -31.969 303.714 49.09 15.34 -99.000
56661.138021 3.312500 1 224.71 5.83 -31.941 303.775 49.19 15.40 -99.000
56661.138194 3.316667 1 224.66 5.91 -31.914 303.835 49.27 15.44 -99.000
56661.138368 3.320833 1 224.61 5.99 -31.886 303.895 49.36 15.49 -99.000
56661.138542 3.325000 1 224.56 6.07 -31.859 303.954 49.41 15.53 -99.000
56661.138715 3.329167 1 224.51 6.15 -31.832 304.013 49.63 15.62 -99.000
56661.138889 3.333333 1 224.46 6.23 -31.804 304.072 49.76 15.69 -99.000
56661.139062 3.337500 1 224.41 6.31 -31.777 304.130 49.68 15.68 -99.000
56661.139236 3.341667 1 224.36 6.39 -31.749 304.188 49.89 15.77 -99.000

```

Fonte: Produção do autor

O arquivo de saída de extensão .Sdt é mostrado na Figura 4.5. As informações que são mostradas em colunas indicam, em ordem, o tempo em UTC fracionado, a média do TEC, o desvio padrão do TEC e a latitude da estação.

Figura 4.5. Arquivo de saída de extensão .sdt do programa GPS TEC Analysis.

0.000	40.51	7.36	-22.69
0.017	40.42	6.68	-22.69
0.033	40.33	6.15	-22.69
0.050	40.23	5.33	-22.69
0.067	40.13	5.54	-22.69
0.083	40.02	5.23	-22.69
0.100	39.91	4.94	-22.69
0.117	39.80	3.76	-22.69
0.133	39.69	3.40	-22.69
0.150	39.57	3.04	-22.69
0.167	39.46	3.00	-22.69
0.183	39.34	2.66	-22.69
0.200	39.22	2.84	-22.69
0.217	39.10	2.74	-22.69
0.233	38.98	2.73	-22.69
0.250	38.86	2.37	-22.69
0.267	38.74	2.97	-22.69
0.283	38.62	3.36	-22.69
0.300	38.50	3.40	-22.69
0.317	38.38	3.23	-22.69
0.333	38.27	2.87	-22.69
0.350	38.15	2.67	-22.69

Fonte: Produção do autor

4.3. CATALOGO DE TEMPESTADES MAGNÉTICAS E HILDCAAS

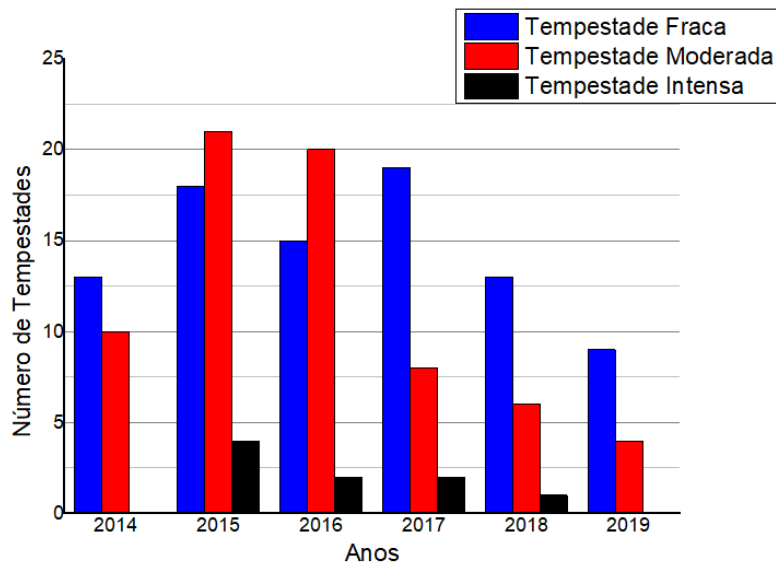
Durante a elaboração deste relatório, concomitantemente, foi criado um catálogo-

go de tempestades magnéticas e HILDCAAs durante a fase descendente do ciclo solar 24, isto é, de abril de 2014 até dezembro de 2019 para a posterior análise do comportamento do TEC diante de perturbações geomagnéticas. Entretanto, a partir de fevereiro de 2018 a Universidade de Kyoto, responsável pela verificação do índice AE (essencial para identificação de HILDCAAs), passou a fornecer apenas dados provisórios do índice AE. Desse modo, o catálogo dos eventos HILDCAAs ocorridos é finalizado no mês de fevereiro de 2018.

Uma vez que HILDCAAs aparecem mais frequentemente associados a formação de regiões de interação corrotante (Corotating Interaction Region, CIR) e uma das principais causas de CIRs são os feixes de alta velocidades que emergem de buracos coronais, que é um fenômeno que ocorre com maior intensidade fora do máximo solar (HAJRA et al., 2013), o período descendente do ciclo solar foi escolhido por ser a época de maior ocorrência de eventos HILDCAAs.

Para o Catálogo de tempestades magnéticas foi desenvolvido um software para a leitura do índice Dst que detecta os instantes em que o índice é menor que -100 nT, os momentos em que o índice fica entre -100 nT e -50 nT e os momentos em que o índice fica entre -49 nT e 30 nT para classificar as tempestades magnéticas como intensa, moderada e fraca, de acordo com a classificação de Gonzalez et al. (1994). O programa desenvolvido, entretanto, não se mostrou 100% eficiente na seleção de todas as tempestades, sendo necessário realizar uma validação manual para confirmação dos eventos catalogados pelo programa e excluir eventuais falsos positivos. A quantidade de tempestades catalogadas separadas por suas respectivas intensidades é mostrada na Figura 4.6. Note que nenhuma tempestade muito intensa ($Dst < -250$ nT) foi registrada durante toda a fase descendente do ciclo solar 24 em conformidade com o publicado por Hajra (2021).

Figura 4.6. Tempestades geomagnéticas catalogadas.

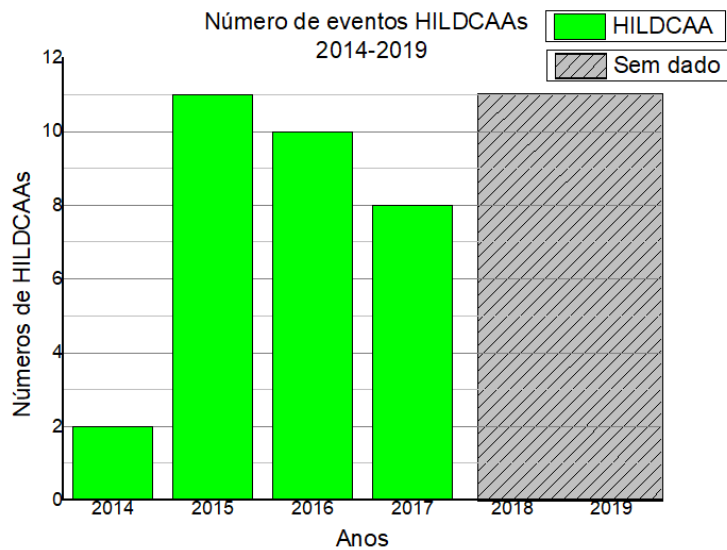


Fonte: Produção do Autor

Ao final, foram catalogadas 87 tempestades fracas, 69 tempestades moderadas, 9 tempestades intensas e nenhuma tempestade muito intensa ou super-tempestades, totalizando 165 tempestades geomagnéticas.

Para o catálogo de eventos HILDCAAs foi desenvolvido um software tendo por base o elaborado por Lamin et al. (2020). O programa desenvolvido, após detectar um valor de índice AE maior que 1000 nT, verifica se em um intervalo de dois dias o índice AE é inferior a 200 nT por mais de 4 horas segundo critério de flexibilização assumido por Lamin et al. (2020). Posteriormente, o critério do índice AE ser inferior a 200 nT por mais de 4 horas para classificar uma HILDCAA foi flexibilizado por ser muito restritivo, como apontado por Tsurutani et al. (2004). Com a flexibilização de um dos critérios para a classificação de HILDCAA, fez-se necessário uma validação manual sobre todos os dados lidos a fim de confirmar todo o catálogo. A Figura 4.7 mostra a quantidade de HILDCAAs que ocorreram por ano no intervalo do tempo do estudo. A região hachurada na Figura indica a falta de dados a partir de 2018 para o índice AE. No total, foram catalogadas 31 HILDCAAs.

Figura 4.7. Eventos HILDCAAs catalogadas.



Fonte: Produção do autor.

4.4. SELEÇÃO DOS EVENTOS PARA ESTUDO

Dentre as 165 tempestades geomagnéticas catalogadas foram selecionadas 6, sendo duas fracas, duas moderadas e duas intensas. Já dentre as 31 HILDCAAs foram escolhidas duas.

Os pares de tempestades geomagnéticas e eventos HILDCAAs foram escolhidos de modo que um fenômeno ocorresse no início da fase descendente do ciclo solar e outro ocorresse no final da fase descendente do ciclo solar. Assim sendo, pode-se comparar, através de estudos de caso, as diferenças do comportamento do TEC no início e no final da fase descendente do ciclo solar 24. Além da comparação do comportamento do TEC para diferentes períodos do ciclo solar (comparação temporal), também é realizado uma comparação do TEC entre as duas estações escolhidas para este estudo (comparação latitudinal). Nesse sentido, a estação localizada em Cachoeira Paulista (CHPI) corresponde a uma estação de baixa latitude, enquanto a estação localizada em São Luís (SALU) corresponde a uma estação de baixa latitude.

A Tabela 4.1 apresenta os oito eventos selecionados, além das principais características de cada um.

Tabela 4.1. Eventos selecionados para o estudo.

ID	Evento	Intensidade	Duração	Mínimo Dst (nT)
TG01	Tempestade	Fraca	06-12-2014 até 09-12-2014	-43
TG02	Tempestade	Fraca	09-07-2019 até 12-07-2019	-32
TG03	Tempestade	Moderada	09-11-2014 até 11-11-2014	-65
TG04	Tempestade	Moderada	13-05-2019 até 15-05-2019	-65
TG05	Tempestade	Intensa	19-12-2015 até 23-12-2015	-155
TG06	Tempestade	Intensa	25-08-2018 até 28-08-2018	-174
HÁ01	HILDCAA	-	27/08/2014 até 01/09/2014	-
HA02	HILDCAA	-	13/10/2017 até 15/10/2017	-

Fonte: Produção do autor.

Dentre as informações contidas na Tabela 4.1, encontram-se: uma identificação para o evento na primeira coluna; se o evento se trata de uma tempestade ou HILDCAA, na segunda coluna; a intensidade do fenômeno para o caso de tempestade geomagnéticas na terceira coluna; a duração do evento na quarta coluna; o mínimo valor alcançado pelo índice Dst para o caso de se tratar de uma tempestade geomagnética na quinta coluna.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo trataremos dos resultados obtidos neste projeto. Conforme mencionado anteriormente, neste estudo foram analisados 8 eventos geomagneticamente perturbados de modo a investigar o comportamento do TEC na ionosfera equatorial e de baixa latitude durante suas ocorrências.

A seguir as análises do comportamento do TEC são apresentadas de acordo com os eventos de intensidade semelhantes.

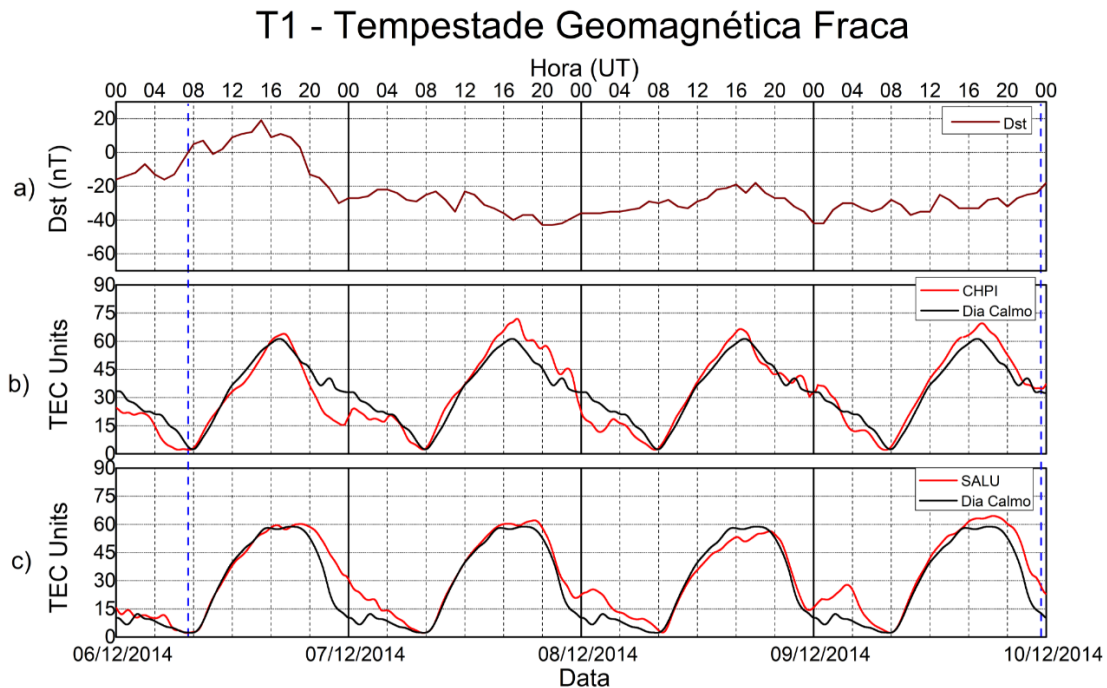
5.1. TEMPESTADES FRACAS

O painel a na Figura 5.1 é referente ao dado do índice Dst (linha na cor vinho), enquanto que os painéis b e c representam o TEC nas estações de Cachoeira

Paulista e São Luís, respectivamente. A linha na cor preta indica a referência de dia calmo e a cor vermelha indica o comportamento do TEC perturbado. As linhas tracejadas azuis estabelecem, na ordem em que aparecem, o início e o final da tempestade geomagnética.

A tempestade geomagnética apresentada no painel a é de intensidade fraca e apresentou um comportamento em que é possível identificar a fase inicial, a fase principal e a fase de recuperação bem pronunciadas. A fase inicial teve início às 07:00 UT do dia 06/12/2014 e, aproximadamente 8 horas depois, o índice Dst atingiu um valor máximo de 19 nT às 15:00 UT. Na fase principal o Dst alcançou um valor mínimo de -43 nT (20:00 UT do dia 07/12/2014).

Figura 5.1. Valores do índice Dst e TECU para as estações de SALU e CHPI para o evento T1.

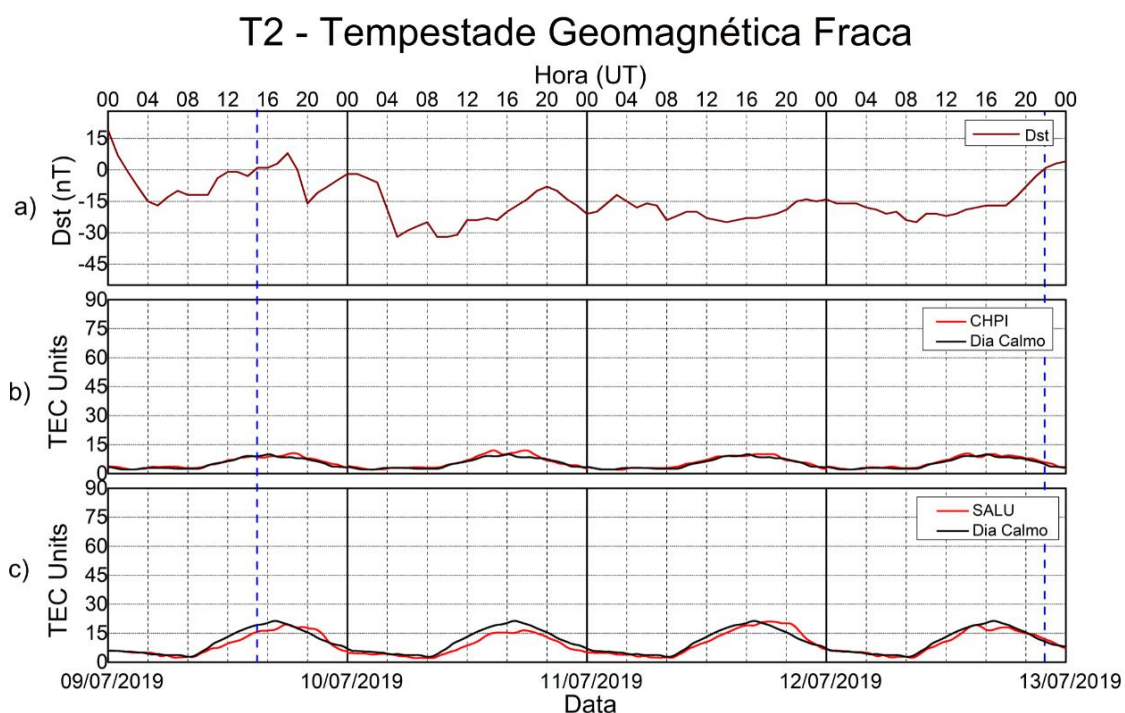


Fonte: Produção do autor.

O painel b mostra que o TEC para estação de Cachoeira Paulista possui valores diários máximos entre às 16:00 UT e 18:00 UT e valores diários mínimos entre às 06:00UT e 09:00 UT. No início da fase principal da tempestade geomagnética é percebida uma pequena perturbação de fase negativa no TEC, que se torna mais pronunciada um pouco antes do final do dia 06/12/2014. Já durante a fase principal da tempestade geomagnética, aproximadamente às

17:30 UT do dia 07/12/2014, ocorreu o maior valor de TEC medido para esse evento, alcançando o valor de 72 TECU. Já para a estação de latitude equatorial, o painel c mostra que o TEC em São Luís possui os maiores valores diários entre 16:00 UT e 20:00 UT, e valores mínimos diários entre as 06:00UT e 09:00 UT. No início da tempestade geomagnética, durante a fase inicial, não é percebida nenhuma perturbação no TEC, a resposta ionosférica só ocorre próximo às 20:00 UT do dia 06/12/2014 com uma fase positiva proeminente. Essa fase positiva do TEC é vista em todos os dias para essa tempestade entre os horários de 20:00 UT e 06:00 UT. A tempestade geomagnética apresentada no painel a da Figura 5.2 também é de intensidade fraca. A fase inicial teve início às 15:00 UT do dia 09/07/2019 e, cerca de 3 horas depois, às 18:00 UT o índice Dst atingiu o valor máximo de 8 nT. O valor mínimo de -32 nT aconteceu às 05:00 UT do dia 10/07/2019.

Figura 5.2. Valores do índice Dst e TECU para as estações de SALU e CHPI para o evento T2.



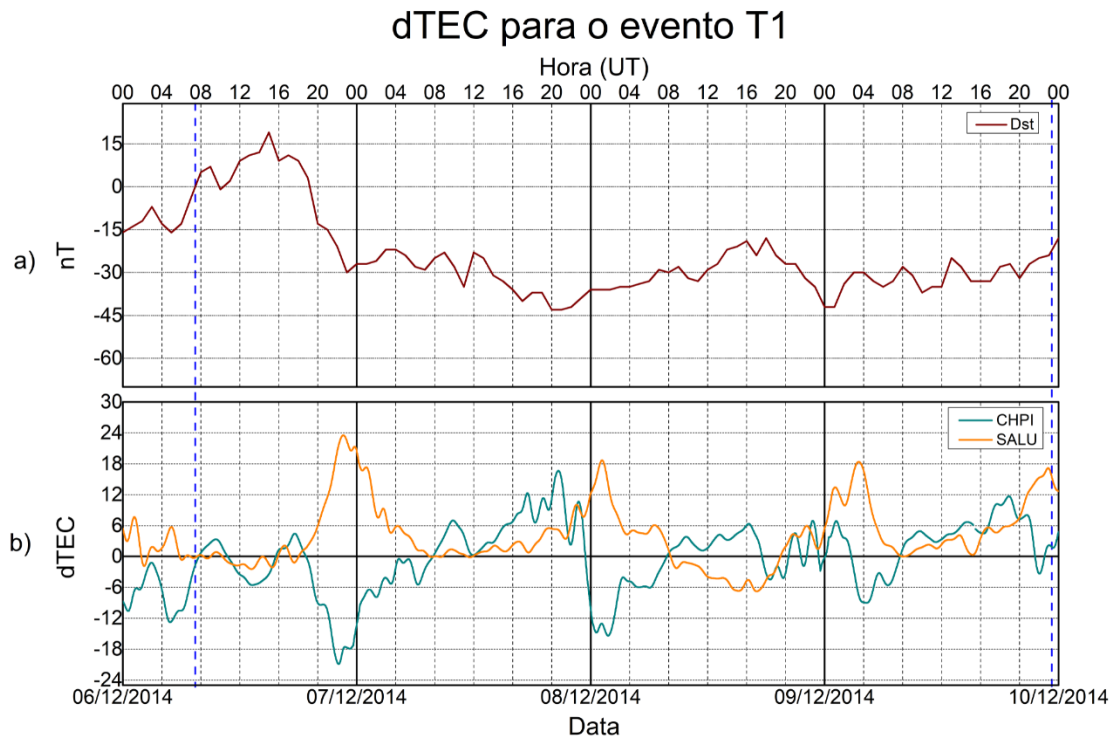
Fonte: Produção do autor.

O painel b da Figura 5.2 mostra que o TEC para estação de Cachoeira Paulista

possui valores diários máximos entre 14:00 UT e 19:00 UT e valores diários mínimos entre as 01:00UT e 09:00 UT. Na fase inicial da tempestade geomagnética, durante o dia 09/07/2019, é percebida uma pequena perturbação de fase positiva no TEC, chegando a medir 10 TECU às 18:30 UT. Aproximadamente, às 14:00 UT do dia 10/07/2019, ocorreu o maior valor de TEC medido durante esta tempestade, 12 TECU. Observa-se que o TEC em CHPI apresentou o comportamento muito semelhante ao padrão de dia calmo. O painel c da Figura 5.2 mostra que o TEC para SALU possui valores diários máximos entre 15:00 UT e 21:00 UT e valores diários mínimos entre as 05:00UT e 09:00 UT. No dia 10/07/2019 ocorre a maior fase negativa desse evento. Observa-se que, apesar do comportamento ser muito semelhante à referência de dia calmo, a maior parte das perturbações ionosféricas decorrentes deste evento foram negativas e, mesmo assim, os valores médios de TEC são maiores para essa estação do que para a estação de Cachoeira Paulista.

Para uma melhor análise do TEC perturbado (dTEC) devido a estas tempestades, as Figuras 5.3 e 5.4 foram elaboradas, onde o painel a refere-se ao índice Dst e os painéis b e c ao dTEC para CHPI (azul) e SALU (amarelo), respectivamente.

Figura 5.3. Valores do índice Dst e dTEC para as estações de SALU e CHPI para o evento T1.



Fonte: Produção do autor

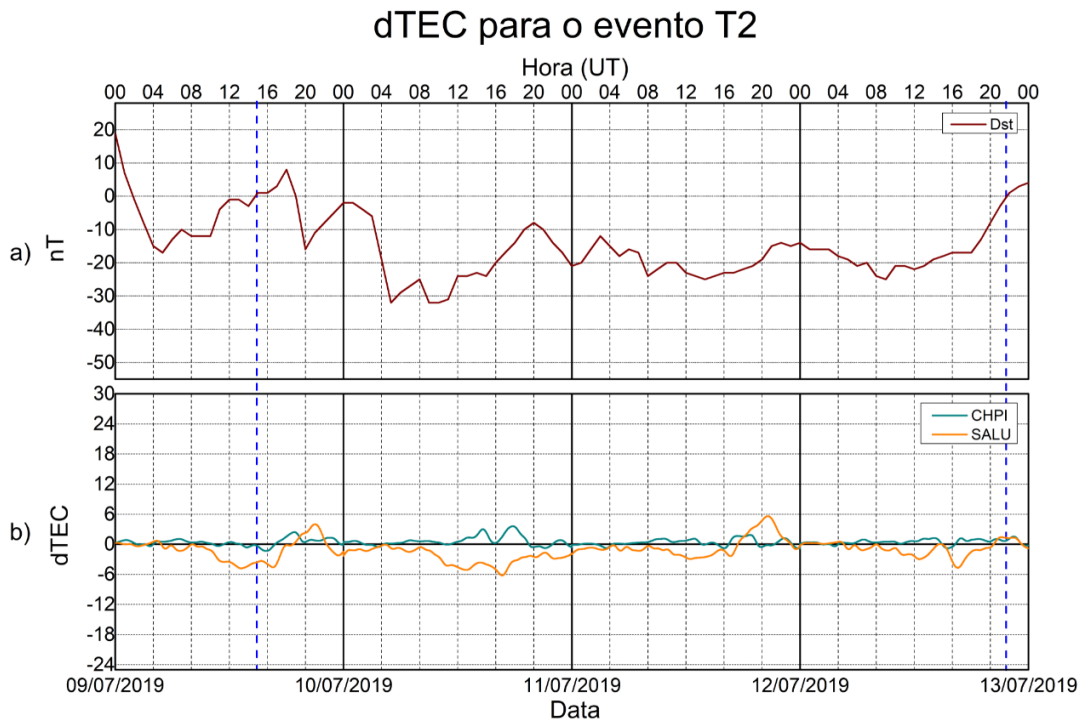
Comparando os painéis b das Figuras, é possível perceber que, apesar de ambas as tempestades terem intensidade fraca, as respostas do TEC a essas tempestades se mostram completamente diferentes, tanto em intensidade quanto em localização latitudinal.

O painel b da Figura 5.3 mostra que o dTEC para estação de Cachoeira Paulista apresentou majoritariamente uma quantidade de variação negativa. A maior variação positiva de dTEC foi 16 TECU (20:30 UT do dia 07/12/2014) durante o início da fase de recuperação da tempestade enquanto que a maior variação negativa foi -20 TECU (20:00 UT do dia 06/12/2014), na fase principal. Enquanto que em São Luís o dTEC é predominantemente negativo. Comparando as duas estações, nota-se visualmente uma correlação negativa no comportamento do dTEC. A maior variação positiva de dTEC para SALU foi 23 TECU (22:30 UT do dia 06/12/2014) durante a fase principal enquanto que a maior variação negativa foi -6 TECU (17:00 UT do dia 08/12/2014).

O painel b da Figura 5.4 mostra que o dTEC para estação de CHPI apesar de

apresentar o comportamento muito semelhante a um dia não perturbado, as poucas variações de TECU foram mais positivas do que negativas. A maior variação positiva foi 3 TECU (18:00 UT do dia 10/07/2019) durante a fase de recuperação da tempestade enquanto que a maior variação negativa foi -1 TECU (16:00 UT do dia 09/07/2019), durante a fase inicial. O dTEC em SALU apresentou um comportamento predominantemente negativo. A maior variação positiva de dTEC foi 6 TECU (21:00 UT do dia 11/07/2019) durante a fase de recuperação, enquanto que a maior variação negativa foi -6 TECU (17:00 UT do dia 10/07/2019), no início da fase de recuperação.

Figura 5.4. Valores do índice Dst e dTEC para as estações de SALU e CHPI.



Fonte: Produção do autor.

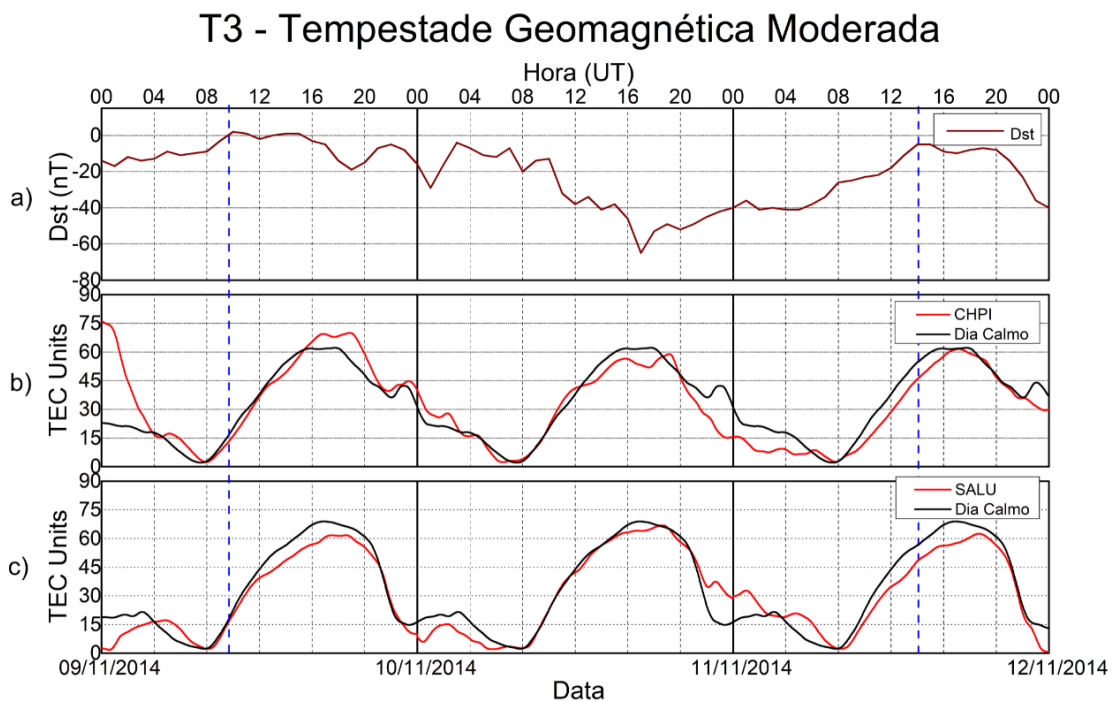
Ao comparar as intensidades do dTEC entre as duas tempestades fica evidente a dependência dos valores do TEC com o ciclo solar, de modo que quanto mais próximo do início da fase descendente, maiores são as perturbações no conteúdo eletrônico da ionosfera. Para ilustrar melhor esse fato, o valor máximo do dTEC em Cachoeira Paulista é 16 TECU no início da fase descendente

e 3 TECU no final da fase descendente, enquanto que em São Luís, o valor máximo do dia perturbado é 23 TECU no início da fase descendente e 6 TECU no final da fase descendente.

5.2. TEMPESTADES MODERADAS

A tempestade geomagnética apresentada na Figura 5.5 é de intensidade moderada. A fase inicial começou às 09:45 UT do dia 09/11/2014, porém sem apresentar *storm sudden commencement* (índice Dst positivo por alguns minutos). Esta tempestade atingiu -65 nT no Dst às 17:00 UT do dia 10/11/2014.

Figura 5.5. Valores do índice Dst e TECU para as estações de SALU e CHPI para o evento T3.



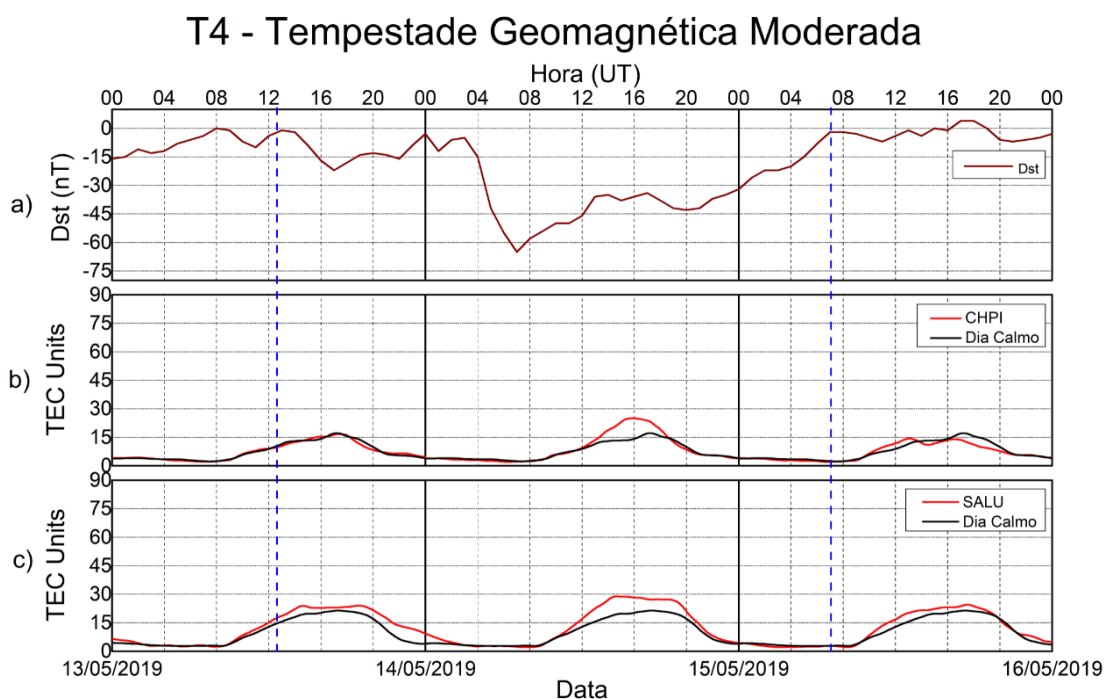
Fonte: Produção do autor

O TEC para CHPI possui valores diários máximos entre 16:00 UT e 20:00 UT e valores diários mínimos entre as 06:00UT e 09:00 UT. No início da tempestade geomagnética, durante o dia 09/11/2014, é percebida uma perturbação positiva no TEC alcançando o valor de 70 TEC às 19:00 UT. Aproximadamente, às 20:00 UT do dia 10/11/2014, cerca de 3 horas depois do início da fase de recuperação, dá início a uma grande fase negativa que se estende até às 6:00 UT do dia 11/11/2014. A estação SALU também apresenta os maiores valores diá-

rios do TEC entre 16:00 UT e 20:00 UT, e valores mínimos entre as 05:00UT e 09:00 UT. No início da tempestade geomagnética, durante o dia 09/11/2014, é percebida uma perturbação de fase negativa no TEC.

A segunda tempestade geomagnética moderada está apresentada na Figura 5.6, e não apresentou fase inicial. A tempestade teve início às 12:30 UT do dia 13/05/2019 e, atingiu -65 nT no Dst às 07:00 UT do dia 14/05/2019.

Figura 5.6. Valores do índice Dst e TECU para as estações de SALU e CHPI para o evento T4.



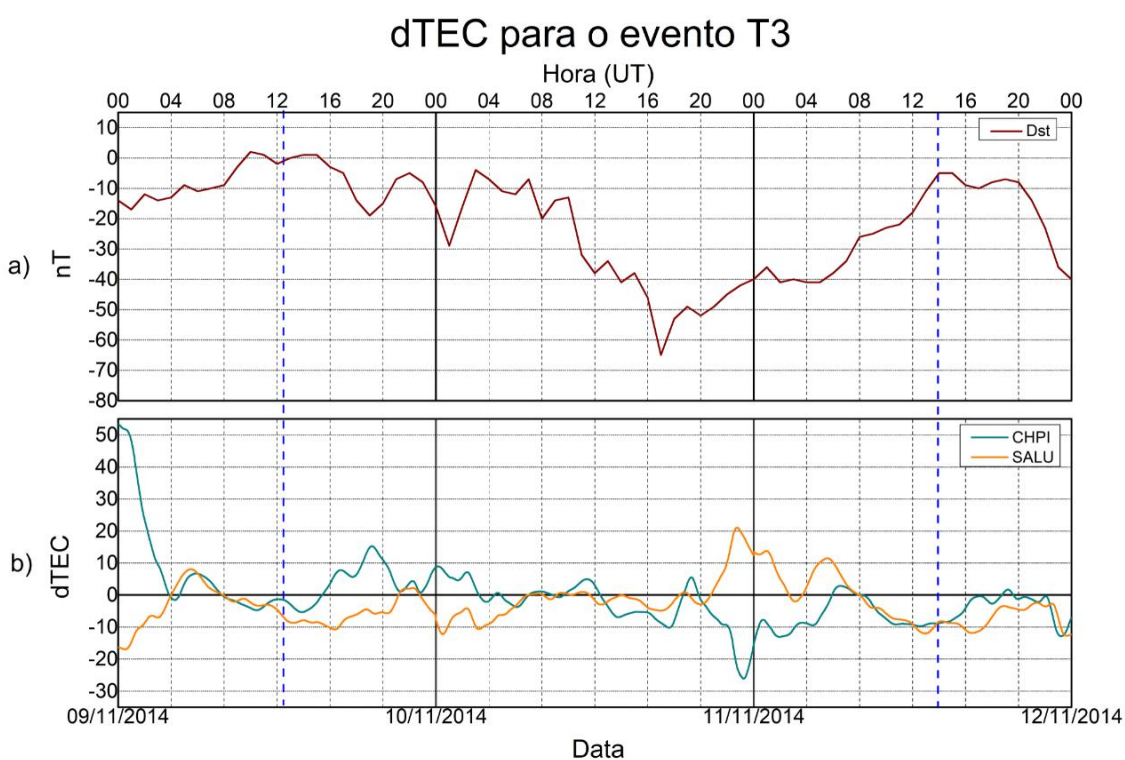
Fonte: Produção do autor.

O painel b da Figura 5.6 mostra que o TEC para estação de Cachoeira Paulista apresentou padrões muito semelhantes ao período calmo, com exceção do dia 14/05/2019 em torno das 13:00 UT às 18:00 UT, quando o maior valor de TEC foi alcançado (24 TECU). O painel c mostra que o TEC em São Luís apresentou variações predominantemente positivas durante toda a tempestade, com valor máximo de 28 TECU às 14:30 UT do dia 14/05/2019.

As Figuras 5.7 e 5.8 representam o dTEC para as duas tempestades moderadas, T3 e T4, respectivamente. É possível ver que o TEC também apresentou comportamentos diferentes em intensidade e localização latitudinal quando ambas as tempestades são comparadas.

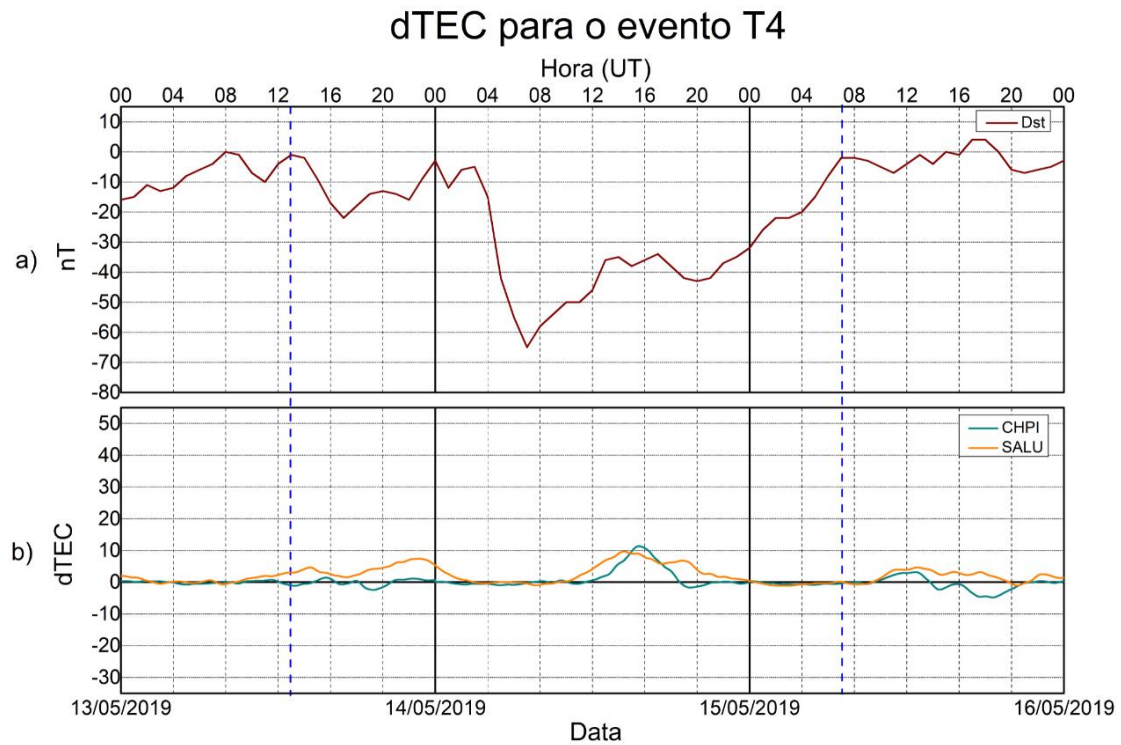
Na Figura 5.7 a maior variação positiva de dTEC foi 15 TECU para CHPI (19:00 UT do dia 09/11/2014) e 21 TECU para SALU (22:30 UT do dia 10/11/2014), enquanto que a maior variação negativa foi -26 TECU para CHPI (23:00 UT do dia 10/11/2014) e -12 TECU para SALU (00:30 UT do dia 10/11/2014). Na Figura 5.8 vemos se confirmar que a tempestade T4, apesar de ser moderada, causou pouco efeito no TEC em CHPI. Os dados oscilam muito pouco em torno do zero, alcançando um pico de 11 TECU, para depois retornar ao padrão calmo. A estação de SALU também foi pouco afetada por esta tempestade com valores de dTEC positivos durante o dia, porém abaixo dos 10 nT, e comportamento de dia calmo durante a noite.

Figura 5.7. Valores do índice Dst e dTEC para as estações de SALU e CHPI para o evento T3.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.8. Valores do índice Dst e dTEC para as estações de SALU e CHPI.



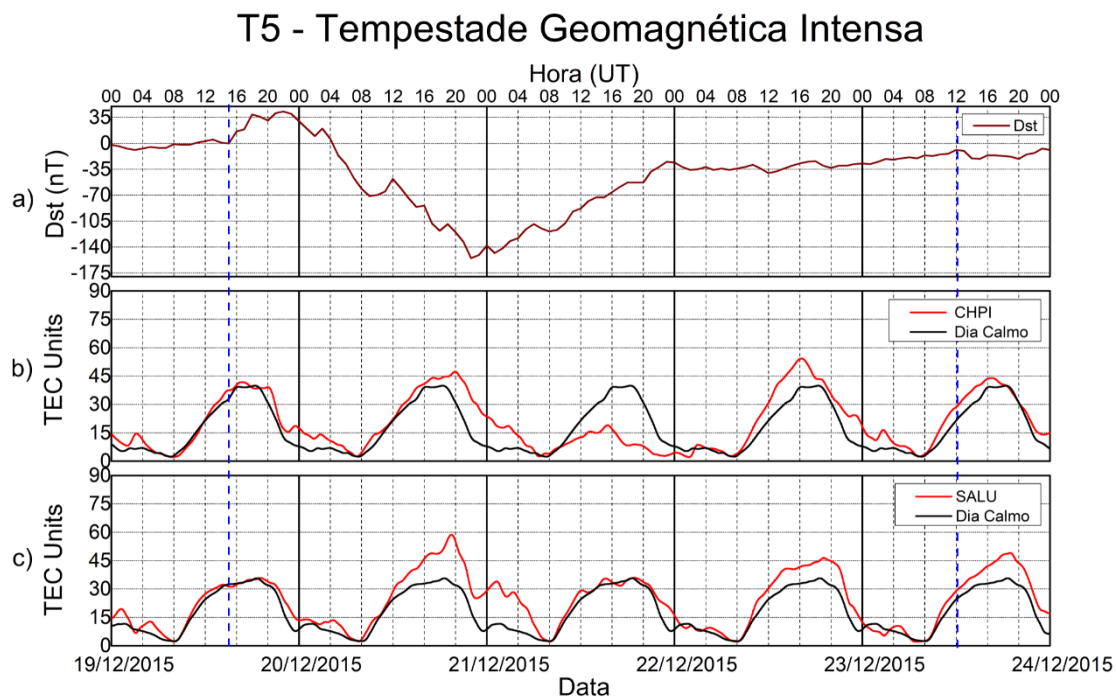
Fonte: Produção do autor.

Em relação a dependência do comportamento do dTEC com o ciclo solar, observa-se que o valor máximo dTEC em Cachoeira Paulista para as tempestades moderadas foi 15 TECU no início da fase descendente do ciclo solar e 11 TECU no final da fase descendente. Para São Luís, os valores máximos foram de 21 TECU no início da fase descendente do ciclo solar e 9 TECU no final da fase descendente do ciclo solar.

5.3. TEMPESTADES INTENSAS

A tempestade geomagnética apresentada na Figura 5.9 é intensa e apresentou um comportamento em que é possível identificar a fase inicial, a fase principal e a fase de recuperação bem definidas. Na fase inicial o índice Dst atingiu um valor máximo de 42 nT, e na fase principal -155 nT.

Figura 5.9. Valores do índice Dst e TECU para as estações de SALU e CHPI para o evento T5.

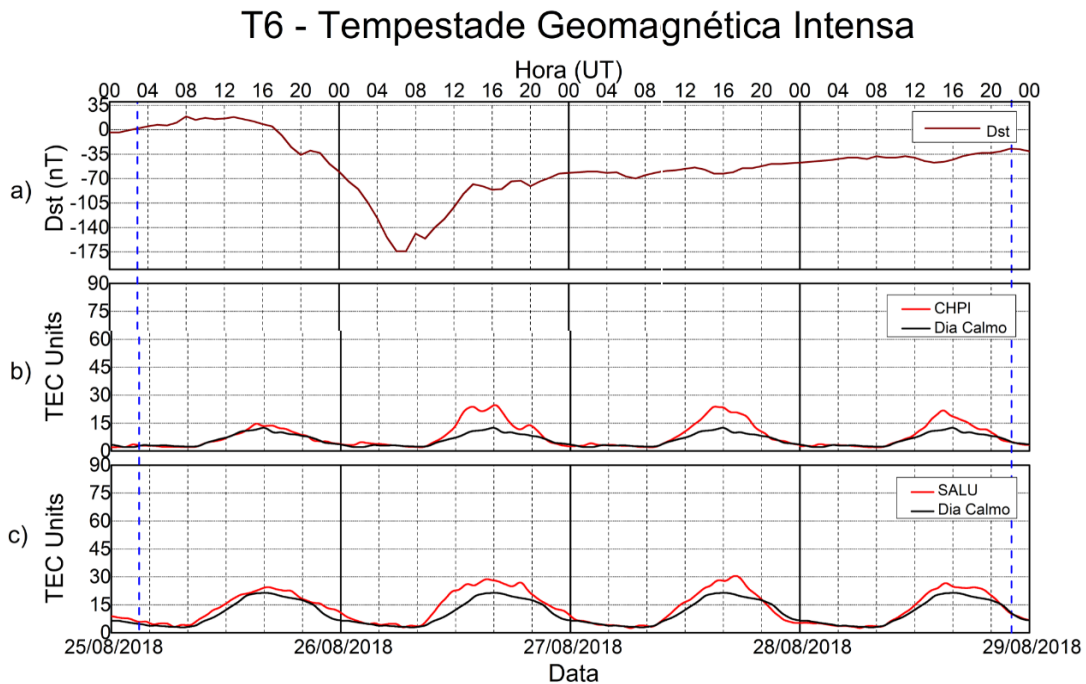


Fonte: Produção do autor.

Na fase inicial da tempestade é percebida uma pequena perturbação no TEC em CHPI a partir das 22:00 UT do dia 19/12/2015. Durante a fase principal, aproximadamente às 16:00 UT do dia 20/12/2015, houve uma grande fase positiva que se estendeu até o dia seguinte às 07:00 UT, quando a partir das 10:00 UT houve uma inversão, resultando na maior fase negativa dessa tempestade que durou até às 02:00 UT do dia seguinte. No painel c vemos que SALU também apresentou uma pequena perturbação no TEC durante a fase inicial, que se torna mais pronunciada a partir das 12:00 UT do dia 20/12/2015 e alcança o valor máximo de 58 TECU às 19:30 UT, já durante a fase principal.

A Figura 5.10 apresenta a segunda tempestade geomagnética intensa estudada neste trabalho, representada pelo índice Dst no painel a. Na fase inicial o índice Dst atingiu um valor máximo de 19 nT, enquanto que na fase principal alcançou -174 nT (06:00 UT do dia 26/08/2018).

Figura 5.10. Valores do índice Dst e TECU para as estações de SALU e CHPI para o evento T6.



Fonte: Produção do autor.

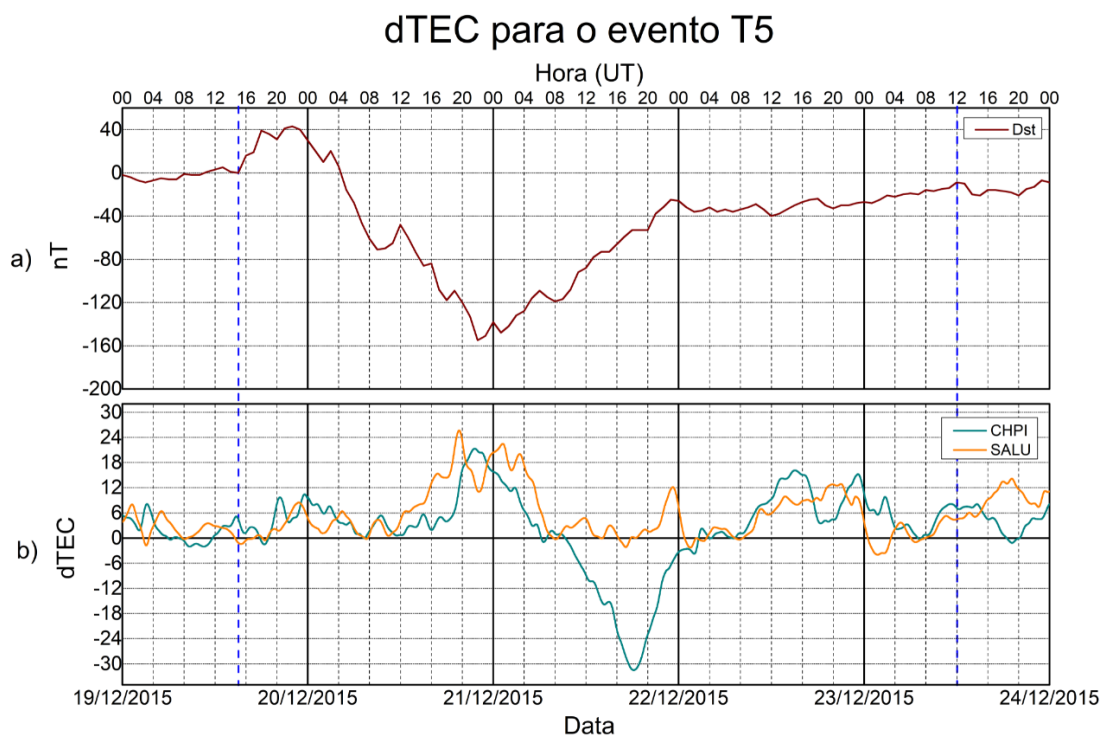
Os painéis b e c mostram que o TEC foi afetado pela tempestade principalmente durante o período diurno, tanto para CHPI quanto para SALU, visto que o comportamento noturno é muito semelhante ao comportamento calmo. Além disso, é interessante notar que o TEC não foi perturbado durante as fases inicial e principal, com exceção de SALU. Os maiores valores registrados foram 24 TECU para CHPI (16:00 UT do dia 26/08/2018) e 30 TECU para SALU (17:00 UT do dia 27/08/2018). Observa-se que todas as perturbações ionosféricas para este evento foram positivas para ambas as estações.

As Figuras 5.11 e 5.12 referem-se ao dTEC para as duas tempestades intensas, T5 e T6 respectivamente. O painel b da Figura 5.11 mostra que o comportamento do dTEC para CHPI é predominantemente positivo no decorrer de toda a tempestade, com exceção de uma grande resposta negativa ocorrida no dia 21/05/2015 (-31 TECU às 18:00 UT). A maior variação positiva de dTEC foi 21 TECU obtida às 21:30 UT do dia 20/12/2015. O dTEC em SALU foi predominantemente positivo durante toda a tempestade, onde seus valores máximos ocorreram entre o final da fase principal e início da fase de recuperação da

tempestade. Nesta estação a maior variação positiva de dTEC foi 25 TECU (19:45 UT do dia 20/12/2015), enquanto que a maior variação negativa foi -4 TECU (01:30 UT do dia 23/12/2015).

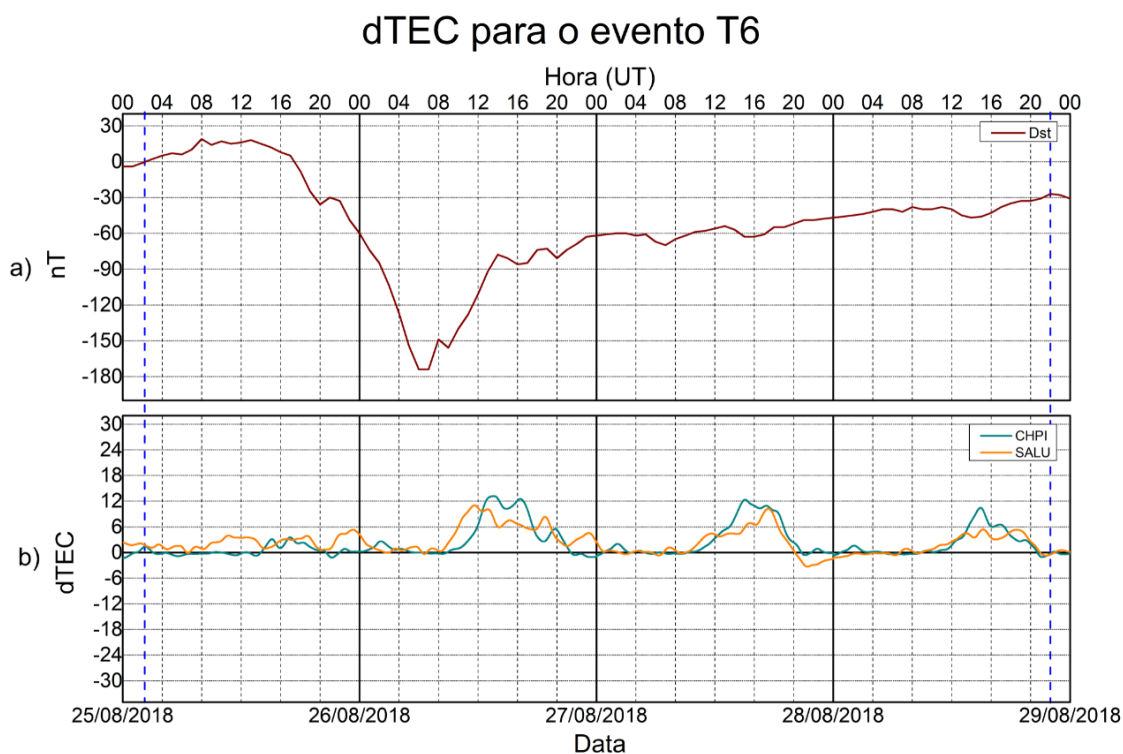
O painel b da Figura 5.12 mostra mais claramente que as principais perturbações no TEC devido a tempestade T6 ocorreram durante a fase de recuperação da tempestade, de forma positiva e principalmente durante o período diurno. Os maiores valores positivos alcançados foram 13 TECU para CHPI (13:30 UT do dia 26/08/2018) e 11 TECU para SALU (11:30 UT do dia 26/08/2018). Os maiores valores negativos foram -1 TECU para CHPI (21:00 UT do dia 25/08/2018) e -3 TECU para SALU (21:30 UT do dia 27/08/2018).

Figura 5.11. Valores do índice Dst e dTEC para as estações de SALU e CHPI para o evento T5.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.12. Valores do índice Dst e dTEC para as estações de SALU e CHPI.

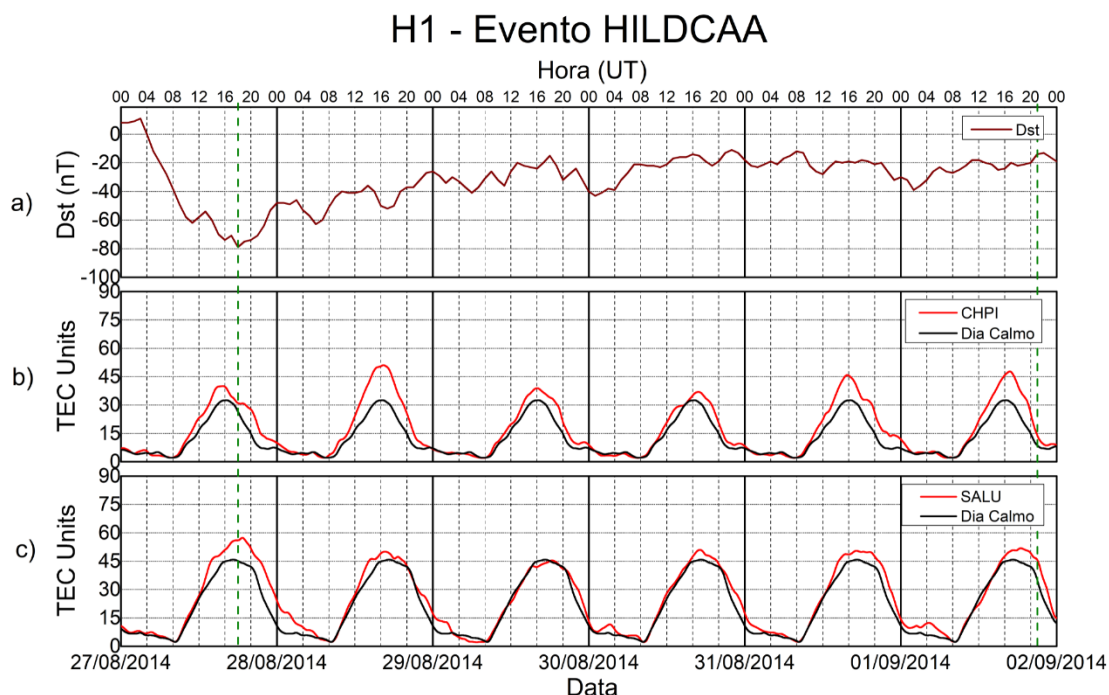


Fonte: Produção do autor.

5.4. HILDCAAs

Nas Figuras 5.13 e 5.14 as linhas verticais verdes tracejadas indicam, na ordem em que aparecem, o início e o final do intervalo HILDCAA, H1 e H2, respectivamente. O painel a da Figura 5.13 mostra o índice Dst para o evento H1, onde uma de suas principais características é observada: ocorrência durante uma longa fase de recuperação. Os painéis b e c mostram o TEC durante este período para CHPI e SALU, respectivamente.

Figura 5.13. Valores do índice Dst e TECU para as estações de SALU e CHPI para o evento H1.

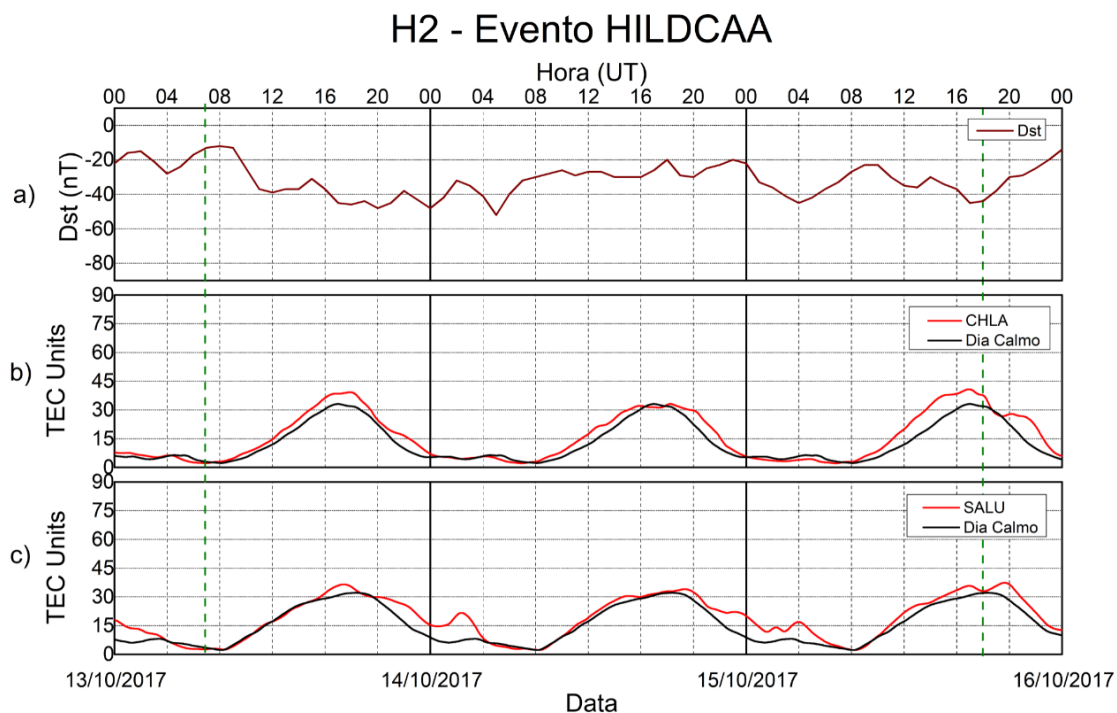


Fonte: Produção do autor.

No painel b da Figura 5.13 nota-se que todas as perturbações proeminentes são de fase positiva. O maior valor registrado em CHPI foi de 51 TECU às 16:00 UT no dia 28/08/2014. Observa-se, também, que houve grande variação de fase positiva no TEC para os dias 31/08/2014 e 01/09/2014. De forma semelhante, a estação de SALU também apresentou apenas perturbações proeminentes positivas com um aumento da fase nos dois últimos dias de HILDCAA. Para SALU, o maior valor registrado foi de 57 TECU (19:00 UT do dia 27/08/2014) próximo ao início da fase principal.

O evento HILDCAA apresentado no painel a da Figura 5.14 mostra que, diferente do H1, não houve tempestade geomagnética antecedendo o H2. A HILDCAA teve início às 07:00 UT do dia 13/10/2017 e se estendeu até às 18:00 UT do dia 15/10/2017.

Figura 5.14. Valores do índice Dst e TECU para as estações de SALU e CHPI para o evento H2.



Fonte: Produção do autor.

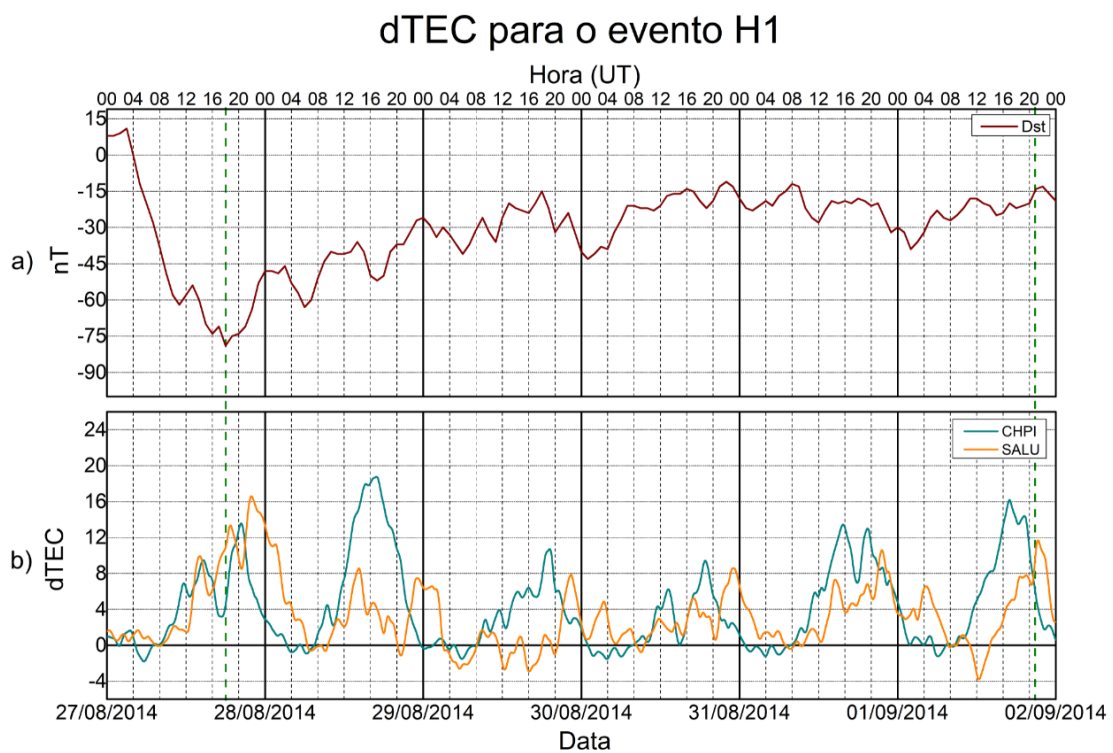
O painel b da Figura 5.14 mostra que as perturbações do TEC em CHPI são predominantemente de fase positiva. O maior valor de TEC perturbado registrado foi de 40 TECU (17:00 UT no dia 15/10/2017), próximo ao fim do evento HILDCAA. O TEC em SALU possui perturbações proeminentes de fase positiva e ocorreram predominantemente no período noturno. O maior valor de TEC perturbado foi de 36 TECU (17:30 UT no dia 13/10/2017).

As Figuras 5.15 e 5.16 referem-se ao dTEC para os dois eventos HILDCAAs, H1 e H2 respectivamente. O painel b da Figura 5.15 mostra que o comportamento do dTEC para CHPI é predominantemente positivo no decorrer de todo o evento. A maior variação positiva de dTEC foi 18 TECU (17:00 UT do dia 28/08/2014) e a maior variação negativa de dTEC foi -1 TECU (04:00 UT do dia 30/08/2014). O dTEC em SALU também foi predominantemente positivo durante toda a HILDCAA, onde a maior variação positiva de dTEC foi 17 TECU (22:00 UT do dia 27/08/2014) e a maior variação negativa de dTEC foi -4 TECU

(12:00 UT do dia 01/09/2014).

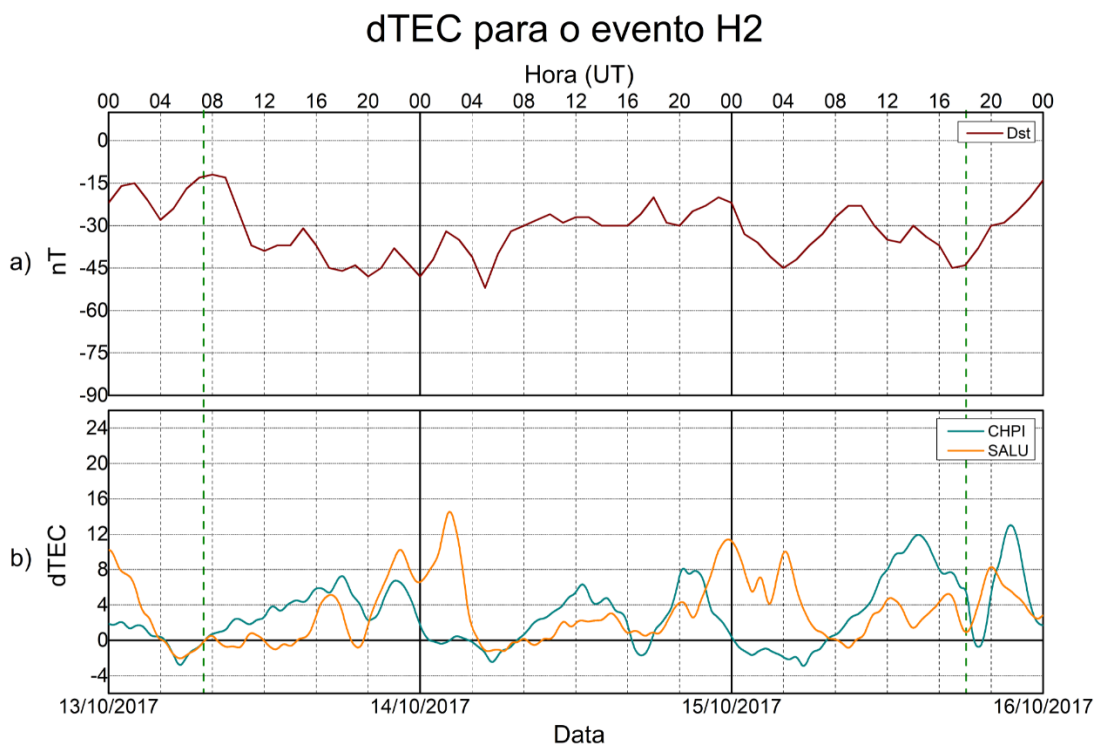
Em relação ao evento H2, a maior variação positiva de dTEC para CHPI foi 12 TECU (14:00 UT do dia 15/10/2017) e a maior variação negativa de dTEC foi -2 TECU (05:30 UT do dia 15/10/2017). O dTEC em SALU também foi predominantemente positivo durante toda a HILDCAA, onde a maior variação positiva de dTEC foi 14 TECU (02:00 UT do dia 14/10/2017) e a maior variação negativa de dTEC foi -1 TECU (05:00 UT do dia 14/10/2017).

Figura 5.15. Valores do índice Dst e dTEC para as estações de SALU e CHPI para o evento H1.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.16. Valores do índice Dst e dTEC para as estações de SALU e CHPI para o evento H2.



Fonte: Produção do autor.

Apesar dos eventos H1 e H2 possuírem durações diferentes, é possível ver que a intensidade do TEC perturbado sofre influência do ciclo solar, de maneira semelhante ao que aconteceu com os eventos de tempestades magnéticas.

Segundo Mendillo (2006), como as tempestades de menor intensidade possuem menor geofetividade, é de se esperar que tempestades mais intensas possuam uma maior variação no dTEC do que tempestades menos intensas, desde que estejam na mesma fase do ciclo solar. Essa previsão é confirmada em todas as tempestades analisadas. A título de exemplo, os valores máximos e mínimos de dTEC na estação de CHPI para os eventos T1 (tempestade fraca) é, respectivamente, 16 e -20 TECU. Essa mesma estação registra valores máximos e mínimos, respectivamente, de 15 e -26 TECU para o evento T3 (tempestade moderada), possuindo uma maior magnitude nos seus valores dTEC.

Ainda para as tempestades geomagnéticas, segundo Habarulema et al. (2013) e Mendillo (2006), espera-se que a maior parte das perturbações no TEC seja de fase positiva além de que só após as primeiras 24 horas do início da tempestade ocorram fases negativas, caso venham a ocorrer. Para os casos selecionados, a maior parte das perturbações foi de fase positiva, entretanto, para as primeiras 24 horas de tempestade, o evento T1 na estação de CHPI e os eventos T2 e T3 nas estações de SALU registraram fases negativas de TEC nas primeiras 24 horas. Como T1, T2 e T3 são classificadas como tempestades fracas ou moderadas e possuem geofetividade baixa/moderada, é possível que essas fases negativas estejam ligadas a flutuações da concentração de elétrons durante o início da tempestade. Para as tempestades T5 e T6 a previsão de que as perturbações de fase nas primeiras 24 horas são positivas é confirmada.

Há uma simetria no dTEC das estações de CHPI e SALU para os eventos T1, T2 e T3 que é digna de nota. Ao comparar as Figuras 5.3, 5.4 e 5.7 percebe-se visualmente uma correlação negativa entre os dados dTEC das duas estações podendo indicar uma possível conexão entre a concentração de elétrons entre a região equatorial e uma região de baixa latitude.

De acordo com Negreti et al. (2017), que avaliaram o comportamento do TEC para HILDCAAs sobre a América do Sul, apesar de tempestades geomagnéticas possuírem uma maior geofetividade, a perturbação ionosférica causada pela HILDCAA pode até causar respostas ionosféricas ainda maiores do que tempestades dependendo das especificidades da HILDCAA, por isso, uma HILDCAA pode apresentar valores dTEC maiores que uma tempestade. Confirmando essa previsão, os eventos H1 e H2 apresentaram um comportamento dTEC semelhante aqueles produzidos por tempestades fracas e moderadas, respectivamente.

Silva et al (2020) ao avaliarem as mesmas duas estações que são usadas nesse estudo durante a fase descendente do ciclo solar, chegaram à conclusão de que 70% de todas as perturbações causadas por HILDCAAs são de fase positiva. As duas HILDCAAs analisadas nesse estudo tiveram mais perturbações

positivas do que negativas, como era esperado, uma vez que a injeção constante de energia e a precipitação energética de partículas causadas pela HILDCAA aumenta a densidade eletrônica da ionosfera.

6. CONCLUSÃO E ESTUDOS FUTUROS

Neste trabalho, analisou-se o comportamento do TEC ionosférico durante perturbações geomagnéticas, as quais seis são tempestade geomagnéticas de diferentes intensidades e duas são eventos HILDCAAs. Os dados obtidos possibilitaram a comparação do comportamento do TEC no início e no final da fase descendente do ciclo solar 24, bem como permitiu comparar as perturbações sofridas pelo TEC em uma região equatorial com uma região de baixa latitude.

Os principais resultados obtidos foram:

- Os dados de dTEC nas estações de CHPI e SALU para as tempestades T1, T2 e T3 apresentaram visualmente uma anticorrelação. Em outras palavras, para uma mesma tempestade geomagnética, enquanto a estação de CHPI marca valores de dTEC positivos a estação de SALU marca proporcionalmente valores de dTEC negativos, e vice-versa. Se faz necessário uma análise com mais eventos para verificar se essa relação se mantém para um número maior de eventos.
- A estação de baixa latitude (CHPI) apresenta maior variabilidade de valores dTEC do que a estação equatorial (SALU). As maiores variações negativa e positiva de dTEC da estação de CHPI foram -31 e 21 TECU, respectivamente. Para SALU, as maiores variações negativa e positiva de dTEC foram -12 e 25 TECU, respectivamente.
- Durante eventos HILDCAAs, todas as fases de TEC perturbadas proeminentes foram positivas e houve poucas variações abruptas de valores de TECU de um dia para outro devido a própria natureza de ocorrência de HILDCAA, uma vez que as entradas de energia magnetosférica para a atmosfera superior da Terra se mantem por longos períodos e de forma aproximadamente constante.

- O comportamento do TEC próximo ao início da fase descendente do ciclo solar tende a apresentar valores maiores quando comparadas com o comportamento do TEC próximo ao final da fase descendente do ciclo solar, resultado que era esperado uma vez a atividade solar é mais intensa próximo ao máximo solar.

Estudos Futuros

Neste trabalho buscou-se compreender o comportamento do TEC durante a fase descecente do ciclo solar 24 através de eventos perturbados de diferentes intensidades. Um catálogo de tempestades geomagnéticas e HILDCAAs foi elaborado, porém optou-se por estudo de casos durante este projeto de Iniciação científica. Contudo, diante dos resultados que foram encontrados onde foi percebido comportamentos de anticorrelação, além de eventos apresentando comportamentos não esperados, uma análise mais ampla responderia melhor estas e outras questões que surgiram. Sendo assim, como perspectiva de estudos futuros, uma análise estatística de todos os eventos catalogados poderia esclarecer comportamentos pontuais vistos nos estudos de caso, além de aprofundar o conhecimento sobre o TEC ionosférico durante o ciclo solar 24, o qual foi reconhecido como o mais fraco (em termos de geofetividade) ciclo solar da era espacial (Hajra, 2021).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, D. N.; KLOBUCHAR, J. A. Modeling the total electron content observations above Ascension Island. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, n. A10, doi:10.1029/JA088iA10p08020, 1983.

BENNETT, J. O.; DONAHUE, M. O.; SCHNEIDER, N.; VOIT, M. **The Cosmic Perspective**. 7. ed. [S. l.]: Pearson, 2013. 832 p. ISBN 0321839552.

CARMO, C. S. **ESTUDO DE DIFERENTES TÉCNICAS PARA O CÁLCULO DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL ABSOLUTO NA IONOSFERA EQUATORIAL E DE BAIXAS LATITUDES**. Orientador: Fábio Becker Guedes. 2018. 119 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - INPE, São Jo-

sé dos Campos, SP, 2018. Disponível em: <http://www.inpe.br/posgraduacao/ges/arquivos/dissertacoes/dissertacao_carolina_carmo_2018.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

COSTA JR., E.; DONAHUE, F.J.R.; CARDOSO, F.R.; ALVES, M.V. O vento solar e a atividade geomagnética. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo , v. 33, n. 4, p. 4301, Dec. 2011. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000400001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 Oct.2020. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000400001>.

DUTRA, R. S.; FERREIRA, D. S. R.; GONÇALVES, A. S. M.; CARVALHO, G. M. Efeitos do vento solar na magnetosfera terrestre: uma abordagem didática dos cinturões de Van Allen. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo , v. 42, e20190164, 2020 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172020000100425&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 Out. 2020. Epub Jan 24, 2020. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2019-0164>.

ESTRELA, R. L. F. **IDENTIFICAÇÃO DE CICLOS MAGNÉTICOS EM ESTRELAS DO TIPO SOLAR OBSERVADAS PELO SATÉLITE KEPLER.** 2017. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais, Universidade Mackenzie, São Paulo, Dezembro de 2016. DOI 10.3847/0004-637X/831/1/57. Disponível em: <http://tede.mackenzie.br/jspui/handle/tede/3415>. Acesso em: 15 out. 2020.

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. **What is a geomagnetic storm?** *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 5771-5792, 1994.

GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; CLUÁ DE GONZALEZ, A. L. Interplane-tary Origin of Geomagnetic Storms. **Space Science Reviews**, 88, p. 529-562, 1999.

HABARULEMA, J. B.; MCKINNELL, L.; BUREŠOVÁ, D.; ZHANG, Y.; SEEMALA, G.; NGWIRA, C.; CHUM, J.; OPPERMAN, B. A comparative study of TEC response for the African equatorial and mid-latitudes during storm conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, [s. l.], v. 102, p. 105–114, setembro 2013. DOI 10.1016/j.jastp.2013.05.008.

HAJRA, R., ECHER, E.; TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. Solar cycle dependence of High-Intensity Long-Duration Continuous AE Activity (HILDCAA) events, relativistic electron predictors?. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [s. l.], v. 118, ed. 9, p. 5626-5638, agosto 2013. DOI 10.1002/jgra.50530. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jgra.50530>. Acesso em: 1 jun. 2021.

HAJRA, R. **Weakest Solar Cycle of the Space Age: A Study on Solar Wind–Magnetosphere Energy Coupling and Geomagnetic Activity**. Solar Physics. 2021. DOI: 10.1007/s11207-021-01774-9.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: Theory and Practice**. Springer-Verlag Wien New York, 2001.

IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS - RBMC**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 24 fev. 2021a.

IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC - Dados diários e situação operacional**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 24 fev. 2021b.

JONAH, O. F. **ANALYSIS OF TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) VARIATIONS OBTAINED FROM GPS DATA OVER SOUTH AMERICA**. Orientador: Eurico Rodrigues de Paula. 2013. 123 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - INPE, São José dos Campos, SP, 2013.

JUAREZ, S. A. S. **DISTÚRBIOS GEOMAGNÉTICOS E IONOSFÉRICOS DURANTE EVENTOS SÍSMICOS MODERADOS E INTENSO**. 2019. 99 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2019. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SNDRP>. Acesso em: 28 nov. 2020.

KELLEY, M.C. **The Earth's Ionosphere**. 2. ed. [S. l.]: Elsevier, 2009. 576 p. ISBN 9780120884254.

LAMIN, I. C. P; OLIVEIRA, V. K; GONZÁLEZ, A. O; PRESTES, A; PILLAT, V. G; CEZARINI, M. **IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE EVENTOS HILDCAA/HILDCAA* PARA O ANO DE 1998 USANDO PYTHON**. Revista Univap, São José dos Campos, SP, v. 26, ed. 52, p. 38-51, dez 2020. DOI ISSN 2237-1753. Disponível em: <https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/2496>. Acesso em: 26 mar. 2021.

LIMA, S. D. **TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS: Origem e consequências**. 2012. 68 p. Monografia (Graduação em Física) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, FORTALEZA – CEARÁ, 2012. Disponível em: http://www.uece.br/fisica/index.php/arquivos/doc_details/144-. Acesso em: 18 out. 2020.

MCNAMARA, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991.

MCNAMARA, L. F. **Radio amateurs guide to the ionosphere**. Flórida, Malabar: Krieger publishing company, 1994.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Unesp. 2008.

MUELLA, M. T. A. H. **MORFOLOGIA E DINÂMICA DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS DE PEQUENA ESCALA E IMAGEAMENTO IONOSFÉRICO POR GPS**. Orientador: Eurico Rodrigues de Paula. 2008. 383 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - INPE, São José dos Campos, SP, 2008.

NEGRETI, P. M. S. **ESTUDO DO CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL NA REGIÃO BRASILEIRA EM PERÍODOS MAGNETICAMENTE PERTURBADOS**. 2012. 90 p. Dissertação (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2012. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/05.10.21.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2020.

POZ, W. R. D. **INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES SOBRE A INFLUÊNCIA DO CLIMA ESPACIAL NO POSICIONAMENTO RELATIVO COM GNSS**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente, 2010. Disponível em: http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/t_dal%20poz_wr.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v.10, n.4, p.935-990, Nov. 1972.

SALOMONI, C. S.; MATSUOKA, M. T.; SOUZA, S. F. EFEITOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NO POSICIONAMENTO RELATIVO COM GPS NA REGIÃO BRASILEIRA: ESTUDO DE CASO PARA 29 DE OUTUBRO DE 2003. **Revista Brasileira de Cartografia**, Belo Horizonte, n. 63/5, p. 575-487, 16 out. 2011. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43754>. Acesso em: 18 out. 2020.

SEEMALA, G. K.; VALLADARES, C. E. **Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008**, Radio Sci., 46, RS5019, 29 out 2011. doi: 10.1029/2011RS004722.

SERRA, S. L. **Valores típicos de campo magnético e plasma do vento**

solar relacionado a eventos HILDCAAS/QUASE-HILDCAAS. 2012. 305 f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, 2012. Disponível em: <https://www1.univap.br/marketing/publico/ipd/mestrado-fisastro/DissSilvioLeiteSerra.pdf>. Acesso em: 9 out. 2020.

SILVA, R. P. **EFEITOS DE EVENTOS HILDCAA NA IONOSFERA EQUATORIAL SOBRE A REGIAO BRASILEIRA: COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS.** 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2013. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.14.18.49/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2020.

SILVA, R. P.; DENARDINI, C. M.; MARQUES, M. S.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J.; PICAÑO, G. A. S.; BORBA, G. L.; SANTOS, M. A. F. Ionospheric total electron content responses to HILDCAA intervals. **Ann. Geophys**, [s. l.], ano 2020, ed. 38, p. 27-34, 6 jan. 2020. DOI <https://doi.org/10.5194/angeo-38-27-2020>. Disponível em: <https://angeo.copernicus.org/articles/38/27/2020/>. Acesso em: 30 nov. 2020.

STRONG, K; VIAL, N; SCHMELZ, J; SABA, J. Understanding Space Weather: The Sun's Domain. **Bulletin of the American Meteorological Society**. 2017.

TAKUCHEV, N. P. A Phenomenon Of Secular Autumn Temperature Decrease In Stara Zagora, Bulgaria. **AIP Conference Proceedings**, Belo Horizonte, ano 2010, v. 1203, 01 2010. DOI 10.1063/1.3322570. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/241419592_A_Phenomenon_Of_Secular_Autumn_Temperature_Decrease_In_Stara_Zagora_Bulgaria. Acesso em: 16 out. 2020.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; GUARNIERI, F.; KAMIDE, Y.; ZHOU, X.; ARBALLO, J. K. Are high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA) events substorm expansion events?. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 66(2), 167-176, 2004.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; GONZALEZ, A. L. C.; GUARNIERI, F. L.; GOPALSWAMY, N.; GRANDE, M.; KAMIDE, Y.; KASAHARA, Y.; LU, G.; MANN, I.; MCPHERRON, R.; SORAAS, F.; VASYLIUNAS, V. Recurrent Magnetic Storms: Corotating Solar Wind Streams. Washington, DC: **American Geophysical Union**, 2006. p. 1-17. (Geophysical Monograph Series, v. 167). doi: 10.1029/167GM03.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The Interplanetary causes of magnetic storms: A review, **Geophysical Monograph Series**, (p. 77– 89). 1997. doi:10.1029/GM098p0077

YAMASHITA, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 1999. 75p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.