



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
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 coorien-
tada pela Dra. Régia Pereira da Silva.

INPE
Natal, RN
2022



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
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 coordenada pela Dra. Régia Pereira da Silva.

INPE
Natal, RN
2022

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por tudo e espero que minha vida possa refletir tamanha gratidão por cada benção.

Agradeço aos meus orientadores Dr. Clezio Marcos de Nardin e Dra. Régia Pereira da Silva pelo companherismo, profissionalismo e amizade. Estou certo que todos os conselhos e orientações foram para alcançar a excelência.

Agradeço aos meus pais, Jailton Felipe Campelo e Helonei Calar Braga Campelo, e ao meu irmão, Jadiel Lucas Braga Campelo, pelo apoio incondicional e por me lembrarem das coisas realmente importantes.

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

Distúrbios geomagnéticos como os provocados por tempestades geomagnéticas e HILDCAAs (do inglês, High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity), podem provocar modificações no comportamento e perfil ionosférico. Essas modificações podem interferir em sinais de satélites, tais como os sistemas de navegação global resultando em erros de medições de distâncias e localização. Os níveis de mudança causados por esses eventos podem ser compreendidos através do Conteúdo Eletrônico Total (TEC do inglês, Total Electron Content) ionosférico. O trabalho descrito neste relatório utilizou dados do TEC de duas estações receptoras de sinais GNSS, uma na região de baixa latitude, em Cachoeira Paulista – SP (22.68° S; 44.98° O), e outra na região equatorial, em São Luís - MA (2.59° S; 44.21° O). A análise do TEC em ambas as estações foi feita usando dados de eventos de tempestades magnéticas e HILDCAAs catalogados ao longo da fase descendente do ciclo solar 24. Os principais resultados encontrados mostram que a ocorrência de Inícios Súbitos de Tempestades (do inglês, SSCs, Storm Sudden Commencements) está diretamente associada com o nível de atividade solar de modo que, quanto mais intensa a atividade solar, maior a quantidade de SSCs observados; as tempestades ionosféricas são majoritariamente positivas, salvo exceções ocorridas em Cachoeira Paulista; e que, independente da classificação da tempestade, a característica de dependência do ciclo solar do TEC é predominante mesmo em uma parcela de $\frac{1}{4}$ do ciclo solar.

Palavras-chave: tempestade geomagnética; HILDCAA; TEC; Ionosfera.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2. 1. VARIAÇÃO DA TAXA DE IONIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA ALTURA DA IONOSFERA.	4
FIGURA 2. 2. ILUSTRAÇÃO DAS TRÊS REGIÕES DA IONOSFERA.	5
FIGURA 2. 3. EXEMPLO DA VARIAÇÃO DO TEC DIURNO MEDIDO NA ESTAÇÃO DE CACHOEIRA PAULISTA.	8
FIGURA 2. 4. EVOLUÇÃO DO TEC MÉDIO GLOBAL E DO NÚMERO DE MACHAS SOLARES. O DESTAQUE EM VERMELHO MOSTRA AS VARIAÇÕES PERIÓDICAS DE MENOR ESCALA DEVIDO A ROTAÇÃO DO SOL.....	10
FIGURA 2. 5. REPRESENTAÇÃO DO EFEITO FONTE E FORMAÇÃO DAS CRISTAS DA ANOMALIA EQUATORIA.....	12
FIGURA 2. 6. CURVA DO ÍNDICE DST DE UMA TEMPESTADE MAGNÉTICA.	18
FIGURA 2. 7. EXEMPLO DO COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES SYM-H E AE DURANTE A OCORRÊNCIA DE HILDCAA.....	20
FIGURA 3. 1. TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS CATALOGADAS.	22
FIGURA 3. 2. EVENTOS HILDCAAS CATALOGADAS.	23
FIGURA 3. 3. OS DIFERENTES SEGMENTOS DO SISTEMA GPS.	25
FIGURA 3. 4. LOCALIZAÇÃO DE TODAS AS ESTAÇÕES DA RBMC.	27
FIGURA 3. 5. LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES SELECIONADAS PARA ESTUDO.	28
FIGURA 3. 6. INTERFACE DO PROGRAMA GPS-TEC ANALYSIS VERSION 3.	29
FIGURA 3. 7. EXEMPLO DO ARQUIVO DE SAÍDA COM EXTENÇÃO * .CMN.	30
FIGURA 3. 8. EXEMPLO DO ARQUIVO DE SAÍDA COM EXTENÇÃO * .STD.	30
FIGURA 4. 1. QUANTIDADE E PROPORÇÃO DE EVENTOS SSCS E SIS; AS PORCENTAGENS SOBRE AS COLUNAS INDICAM A PROPORÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE SSCS OU SIS EM RELAÇÃO AO TOTAL DE TEMPESTADES EM DADO ANO.....	32
FIGURA 4. 2. HISTOGRAMA PARA AS TEMPESTADES FRACAS NAS	

ESTAÇÕES DE SALU E CHPI.....	34
FIGURA 4. 3. HISTOGRAMA PARA AS TEMPESTADES MODERADAS NAS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI.....	35
FIGURA 4. 4. HISTOGRAMA PARA AS TEMPESTADES INTENSAS NAS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI.....	35
FIGURA 4. 5. HISTOGRAMA PARA HILDCAAS NAS ESTAÇÕES DE SALU E CHPI.....	37
FIGURA 4. 6. VALORES MÉDIOS DE TEC MEDIDOS ÀS 10 HORAS UT NA ESTAÇÃO DE SALU.....	39
FIGURA 4. 7. VALORES MÉDIOS DE TEC MEDIDOS ÀS 10 HORAS UT NA ESTAÇÃO DE CHPI.....	39
FIGURA 4. 8. MÉDIA DOS VALORES DE TEC PARA CADA TIPO DE EVENTO MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE SALU.....	41
FIGURA 4. 9. MÉDIA DOS VALORES DE TEC PARA CADA TIPO DE EVENTO MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE CHPI.....	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 2. 1. CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DA PERTURBAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO USANDO O ÍNDICE KP.	15
TABELA 2. 2. CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DE TEMPESTADES MAGNÉTICAS.....	17
TABELA 3. 1. FREQUÊNCIAS DOS SINAIS L1 E L2 COMO MÚLTIPLO DE UMA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL.....	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1. CONTEÚDO DO TRABALHO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. FORMAÇÃO E DIVISÃO DA IONOSFERA	3
2.2. Conteúdo Eletrônico Total (TEC)	7
2.2.1 Variação diurna	7
2.2.2 Variação Sazonal	8
2.2.3 Variação do ciclo solar	10
2.2.4 Variação latitudinal	11
2.3. ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS	14
2.3.1 Índice Dst e SYM-H	14
2.3.2 Índice Kp	15
2.3.3 Índice AE	16
2.4. PERTURBAÇÕES GEOMAGNÉTICAS	16
2.4.1 Tempestades Geomagnéticas	16
2.4.2 HILDCAAs	18
3. METODOLOGIA E DADOS	20
3.1. BANCO DE DADOS	20
3.1.1 Dia calmo de referência	23
3.2. INSTRUMENTAÇÃO	24
3.2.1 Satélites GNSS	24
3.2.2 RBMC	26
3.3. GPS-TEC ANALYSIS VERSION 3	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1. PROPORÇÃO ENTRE TEMPESTADES CATALOGADAS E SSCs/SIs	31
4.2. ANÁLISE DE DEPENDÊNCIA DO CICLO SOLAR	33
4.2.1. Tempestades fracas	33
4.2.2 Tempestades moderadas	34
4.2.3 Tempestades intensas	35
4.2.4 HILDCAAs	37
4.3. ANÁLISE SOBRE AS RESPOSTAS LATITUDINAIS	40
5. CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
APÊNDICE A - DIAS CALMOS PARA REFERÊNCIA UTILIZADOS NESTE TRABALHO	52

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Durante o período de setembro de 2021 até agosto de 2022 foram realizadas atividades de cunho teórico e prática que estão previstas no plano de trabalho. No âmbito teórico, foram realizadas revisões teóricas sobre temas relacionados ao Sol, meio interplanetário, ionosfera, magnetosfera e instrumentação. No âmbito prático, foram utilizados programas computacionais estatísticos e gráficos para extrair informações do catálogo de tempestades e HILDCAAs (do inglês, High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity) produzido no ciclo de Iniciação Científica anterior (2020-2021); também foi realizada a elaboração de textos científicos como resumos e relatórios, bem como participação em reuniões técnico-científicas virtuais e presenciais.

O projeto desenvolvido teve como objetivo principal contribuir para o melhor entendimento do comportamento da ionosfera através do Conteúdo Eletrônico Total (TEC do inglês, Total Electron Content) em baixas latitudes e em latitudes equatoriais sobre a região brasileira durante períodos geomagneticamente perturbados.

Além do objetivo científico, o projeto também visou dar continuidade ao desenvolvimento do bolsista na carreira científica através da pesquisa na área de Ciências Espaciais e Atmosféricas; proporcionar aprendizagem de métodos de pesquisa, além do aprimoramento de métodos já aprendidos, utilizando dados científicos e refletindo sobre os seus significados através dos dados de GNSS e índices geomagnéticos e parâmetros interplanetários; aprofundar o uso de ferramentas computacionais necessárias para manipular arquivos; dar continuidade a aprendizagem através dos estudos dirigidos de artigos científicos, debates e análises de fenômenos, irregularidades e física da ionosfera no campo da linha de pesquisa ao qual este projeto está inserido; permitir a continuação do desenvolvimento do pensamento científico ao incentivar a investigação, reflexão e elaboração de hipóteses com base nos resultados encontrados na pesquisa; e por fim, auxiliar a aprimorar a habilidade de escrita científica visando a elaboração de resumos, relatórios e artigos dentro dos padrões no intuito de promover e divulgar os resultados obtidos da pesquisa.

1.1. CONTEÚDO DO TRABALHO

O conteúdo desse trabalho está dividido em 5 capítulos. No capítulo 2 deste relatório é realizada uma revisão dos principais conceitos e fenômenos ligados à pesquisa que foi desenvolvida. A revisão se concentra no estudo da ionosfera, seu comportamento, formação, variabilidade, estratificação e como a concentração da ionosfera pode ser medida.

No capítulo 3 é abordada a instrumentação e metodologia usados neste trabalho. Inicialmente é apresentado o banco de dados trabalhado na pesquisa tais como o catálogo de tempestades magnéticas e HILDCAAs e o catálogo de dias calmos usando o índice Kp. Em seguida é mostrado como são obtidos os arquivos RINEX e de que modo o programa GPS-TEC Analysis version 3 foi utilizado para a obtenção do TEC (TEC do inglês, Total Electron Content ou Conteúdo Eletrônico Total).

O capítulo 4 é dividido em três partes as quais são dedicadas aos resultados e discussões. A primeira parte é voltada a analisar possíveis correlações entre as ocorrências de tempestades geomagnéticas, Storm Sudden Commencements (SSCs) e Sudden Impulses (SIs); a segunda parte é dedicada para a análise da dependência do TEC com o ciclo solar; a terceira parte destina-se a comparar os resultados latitudinais das respostas do TEC entre as estações de São Luís e Cachoeira Paulista.

O capítulo 5, por fim, apresenta as conclusões do trabalho realizado durante o ciclo de Iniciação Científica 2021-2022.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os tópicos essenciais para a compreensão do desenvolvimento do tema em análise. A seção 2.1 apresenta a formação da ionosfera e a seção 2.2 delinea como o TEC se comporta com a variação de diferentes parâmetros, tais como: variação diurna, sazonal, ciclo solar e latitudinal; a seção 2.3 aborda os índices geomagnéticos utilizados para identificar e classificar os eventos estudados e, por fim, a seção 2.4 apresenta as duas principais perturbações estudadas nesse trabalho, as tempestades magnéticas e HILDCAAs.

2.1. FORMAÇÃO E DIVISÃO DA IONOSFERA

As distintas regiões da atmosfera da Terra podem ser divididas usando diferentes critérios. Esses critérios podem levar em conta a variação de algum parâmetro como temperatura, composição química ou ionização (HARGREAVES, 1979). Nesse estudo será dado enfoque à divisão da atmosfera de acordo com a densidade de elétrons que compõem a ionosfera. A ionosfera é uma camada da atmosfera formada principalmente através da fotoionização de moléculas e átomos que absorvem energia da radiação solar na faixa do ultravioleta (UV), ultravioleta extremo (EUV) e raios-X para formar íons e elétrons. Esse processo é responsável por criar uma região na atmosfera rica em partículas carregadas que se situa a 50 km de altitude e se estende até 1000 km, aproximadamente.

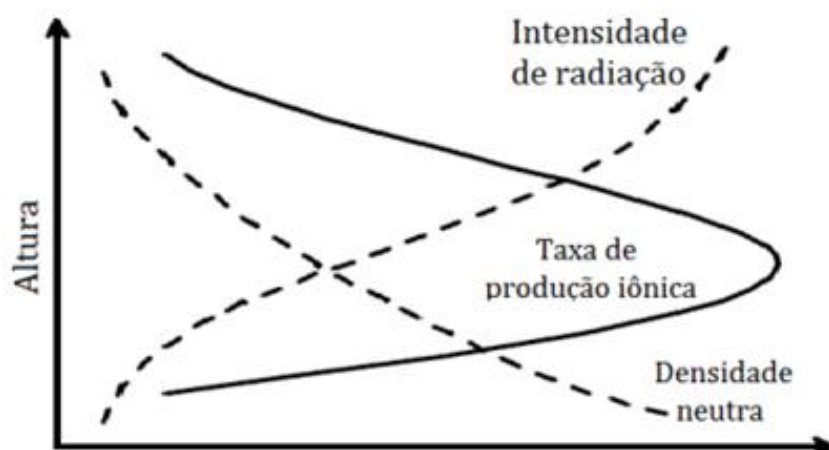
Além do processo da fotoionização, também denominado de ionização primária, um outro processo em que é possível gerar elétrons e íons livres é chamado de ionização corpuscular (ou secundária). Esse processo acontece em menor proporção que a ionização primária e ocorre pelo choque de partículas energéticas carregadas provindas do Sol, através do vento solar, ou provindas do meio intergaláctico, por meio dos raios cósmicos, com as partículas neutras da atmosfera. (KELLEY, 2009).

Além do processo de produção de íons e elétrons, na ionosfera também ocorre a perda de partículas carregadas. Esse processo ocorre, geralmente, através da

recombinação de elétrons e íons. Isso pode ocorrer através de duas formas distintas: (1) a recombinação dissociativa, em que os elétrons se ligam diretamente a moléculas carregadas positivamente separando cada molécula carregada positivamente em duas outras moléculas neutras, e (2) a recombinação radiativa, em que os elétrons se ligam diretamente a íons de cargas positivas resultando em átomos neutros. Na parte mais baixa da ionosfera, ainda há a possibilidade de elétrons serem perdidos por um terceiro processo chamado de processo de junção, no qual elétrons ligam-se a átomos neutros resultando em íons de carga negativa (MATSUOKA, 2007).

Uma vez que a fotoionização é a principal responsável pela ionização da atmosfera neutra, a ionosfera é produzida quase que praticamente pela radiação solar, de maneira que a medida que a radiação penetra na atmosfera, a produção de elétrons aumenta até um nível onde a densidade eletrônica é máxima. Abaixo dessa região de densidade máxima, a produção de elétrons e íons tende a diminuir, visto que a densidade de constituintes neutros aumenta e parte da radiação foi absorvida, a taxa de recombinação predomina sobre a taxa de produção. Esse mecanismo é apresentado na figura 2.1 em que as curvas tracejadas representam a intensidade da radiação solar e a densidade de partículas neutras da atmosfera e a curva sólida representa a taxa de produção iônica. Note que a altura em que ocorre a máxima taxa de ionização é a mesma em que há a intersecção entre as curvas tracejadas (NEGRETI, 2012).

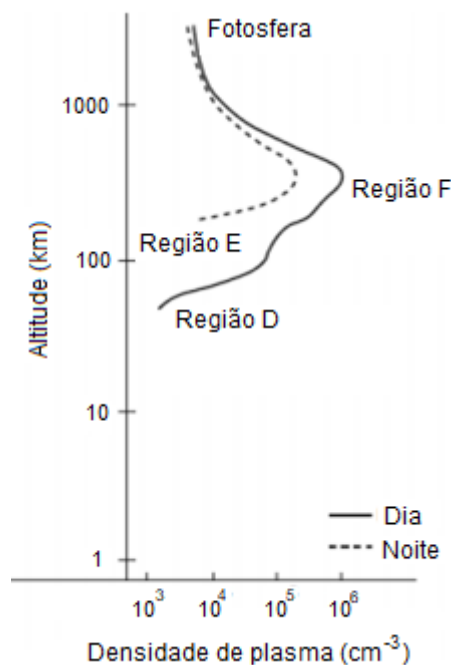
Figura 2. 1. Variação da taxa de ionização em função da altura da ionosfera.



Fonte: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1997)

Desse modo, através dos mecanismos de perdas e ganhos de elétrons e íons, a ionosfera mantém-se em equilíbrio dinâmico com características de densidade típicas que podem ser melhor visualizadas no perfil da concentração de plasma na figura 2.2. A linha tracejada indica a densidade de plasma durante a noite e a linha contínua representa a densidade de plasma durante o dia, nela destacam-se três regiões ou camadas: D, E e F. Ao comparar a linha contínua com a linha tracejada, nota-se que o tamanho e a densidade da ionosfera noturna são menores, uma vez que não há fonte de ionização primária durante o período noturno, resultando em perdas de partículas carregadas por recombinação (NEGRETÍ, 2012).

Figura 2. 2. Ilustração das três regiões da Ionosfera.



Fonte: Adaptado de Kelley (2009)

A região F, a mais distante região da superfície da Terra, está localizada entre 140 km e 1000 km, e a frequência de colisão entre os átomos, moléculas e elétrons dessa região é baixa devido a baixa densidade de partículas. 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. A camada F2 é a mais dinâmica e mais densa da ionosfera, estando localizada em uma faixa de altura que vai de 200 até 1000 km de altitude, embora essa altura possa variar dependendo das condições geofísicas (MATSUOKA, 2007). Algumas vezes, durante o período da manhã, a camada F2 da ionosfera equatorial e de baixa latitude pode subir para maiores altitudes formando uma terceira camada, chamada de F3 (BALAN et al., 1998).

Em relação a produção de íons na camada F, verifica-se que a radiação EUV entre os comprimentos de onda $100 \text{ \AA} < \lambda < 1210 \text{ \AA}$ é principalmente absorvida nessa camada para formar, em maior parte, os íons O^+ . Dito isso, a faixa de comprimentos de onda entre $796 \text{ \AA} < \lambda < 910 \text{ \AA}$, é absorvida nessa camada para a formação dos íons O^+ e O_2^+ , enquanto que a faixa entre $732 \text{ \AA} < \lambda < 796 \text{ \AA}$ é responsável por produzir os íons N_2^+ , O^+ , O_2^+ e H^+ (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; PICANÇO, 2019; NOGUEIRA, 2009).

A região E se estende em uma faixa de altura que vai de 90 km até 150 km, e é caracterizada por um crescimento na densidade eletrônica entre 90 a 110 km, atingindo, próximo a 110 km, o seu pico de densidade. Acima dos 110 km de altitude a densidade eletrônica começa a decair até a altitude de 140 km, onde se inicia a região F (MATSUOKA, 2007).

Com respeito a fonte de ionização da camada E, observa-se que a radiação solar no espectro dos raios-x ($\lambda < 10 \text{ \AA}$) é a principal fonte de ionização dos constituintes dessa camada, que ioniza as moléculas neutras O_2 e N_2 nos íons O_2^+ e NO^+ . Outra característica nessa camada é a presença de íons metálicos originados de meteoros como: Fe^+ , Mg^+ , Ca^+ e Si^+ . (NOGUEIRA, 2009)

A região D, a mais próxima da superfície da Terra, está situada entre 50 km a 90 km e apresenta densidade eletrônica muito menor que a densidade de partículas neutras uma vez que a frequência de colisões entre os constituintes da região D é elevada. A camada D é afetada pela variação diurna de tal modo que, durante o período noturno, a diminuição na taxa de ionização e o aumento da taxa de recombinação resultam na ausência dessa camada (MATSUOKA, 2007).

Quanto a forma de ionização da região D, observa-se que a radiação solar na faixa dos raios-X ($\lambda < 10 \text{ \AA}$) é a principal fonte de ionização das moléculas neutras

NO , O_2 e N_2 que, após a ionização, formam os produtos NO^+ , O_2^+ e N_2^+ (PICANÇO, 2019).

2.2. Conteúdo Eletrônico Total (TEC)

Nesse presente relatório, o comportamento da ionosfera é avaliado utilizando um parâmetro chamado de TEC (do inglês “Total Electron Content” ou Conteúdo Eletrônico Total). Esse parâmetro representa a quantidade de elétrons presentes no volume cuja área da seção transversal é 1 m^2 e cuja coluna se estende desde a superfície da Terra até uma determinada altura. 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/ m^2 (MATSUOKA, 2007; NEGRETI, 2012).

O TEC é consideravelmente influenciado por diversos fatores, entre eles: variações diurnas, sazonais, variações do ciclo solar, variações do campo geomagnético, variações causadas por anomalias e irregularidades, dentre outras variáveis. A seguir, destacamos alguns desses aspectos (POZ; CAMARGO, 2008; NEGRETI, 2012; CARMO, 2018).

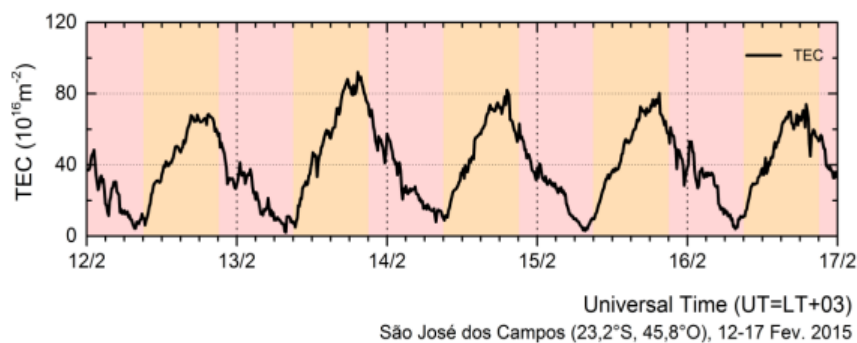
2.2.1 Variação diurna

A variabilidade diurna do TEC é profundamente dependente da radiação solar ionizante de modo que mudanças no fluxo dessa radiação impactam o comportamento do TEC. Desse modo, durante o período diurno a ionização da ionosfera tende a aumentar até alcançar um valor máximo do TEC, que em geral ocorre entre às 12 e 16 horas local (WEBSTER, 1993). Esse valor máximo para o TEC ocorre em função do ângulo zenital do Sol (χ) de modo que à medida que o ângulo solar zenital aumenta, a produção de elétrons e íons diminui e quando o Sol estiver no zênite ($\chi=0$) o valor de TEC é máximo (PICANÇO, 2019). Durante o período noturno a concentração de íons e elétrons decresce até alcançar um valor mínimo pouco antes do amanhecer (NEGRETI, 2012).

Outro parâmetro igualmente importante na variação do TEC diário é a altura da camada atmosférica. A importância desse parâmetro reside no fato de que à medida que o ângulo solar zenital aumenta, a produção de íons e elétrons reduz e a região de maior densidade eletrônica passa a ocorrer em alturas superiores, em razão de as regiões superiores da atmosfera receberem radiação solar por mais tempo (PICANÇO, 2019; DAVIES, 1990).

A figura 2.3 mostra um exemplo de como o TEC diurno variou entre os dias 12 e 17 de fevereiro de 2015 para uma estação GNSS localizada em São José dos Campos.

Figura 2. 3. Exemplo da variação do TEC diurno medido na estação de Cachoeira Paulista.



Fonte: PICANÇO (2019)

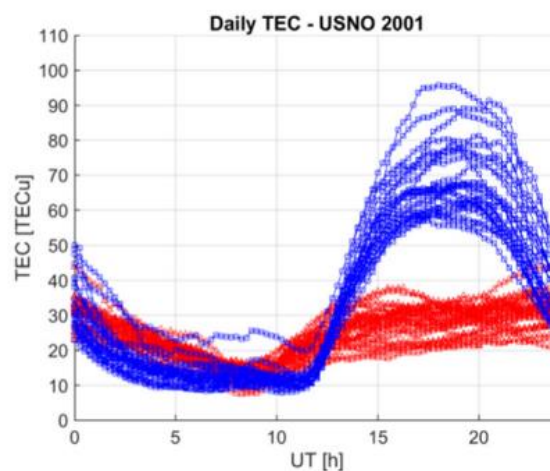
Na figura 2.3 é possível verificar o comportamento do TEC em que os valores máximos ocorrem, aproximadamente, às 18:00h UT (15:00h LT) e os menores valores de TEC ocorrem às 07:00h UT (04:00h LT).

2.2.2 Variação Sazonal

As diferentes estações do ano também impactam na densidade de elétrons e íons ionosféricos. Isso ocorre porque a mudança do ângulo zenital do Sol altera a intensidade do fluxo de ionização nos diferentes hemisférios. Desse modo, ao dividirmos o ano em solstício de dezembro (novembro, dezembro e janeiro), equinócio de março (fevereiro, março e abril), solstício de junho (maio, junho e

julho) e equinócio de setembro (agosto, setembro e outubro) é observado que, em geral, a densidade eletrônica máxima da região F diurna são maiores no equinócio de março em baixa latitude enquanto que, em média latitude, a temporada de verão exibe alta densidade eletrônica. Entretanto, durante períodos diurnos de máxima atividade solar em médias latitudes, ocorre a anomalia de inverno no qual os valores do TEC do inverno (solstício de dezembro) tendem a ser maiores do que no verão (solstício de junho) (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; SEUN, 2021).

A figura 2.4 mostra a variação diurna média do TEC em uma estação de média latitude localizada em Washington, nos Estados Unidos (39,919°S, 77,066°W), para o ano de 2001, ano de alta atividade solar. As curvas na cor vermelha indicam o valor do TEC diário para o mês junho (verão) e as curvas na cor azul representam o TEC diário para o mês de dezembro (inverno). Na figura é possível observar o efeito da anomalia de inverno responsável por apresentar maiores valores de TEC durante o inverno.



Fonte: AZPILICUETA e NAVA (2020)

Negreti (2012), Rishbeth e Garriott (1969) e Seun (2021), ao discutirem resultados de trabalhos anteriores que analisaram o comportamento do TEC global considerando as anomalias, afirmam que durante a ocorrência da anomalia de inverno, ventos neutros movem-se do hemisfério do verão para o hemisfério do inverno, elevando o plasma da região F no hemisfério do verão e abaixando-o

no hemisfério do inverno. Desse modo, a dinâmica causada por esses ventos neutros pode modificar a composição atmosférica entre os hemisférios aumentando a razão $[O]/[N_2]$ na camada F2 que resulta em uma maior densidade eletrônica em médias latitudes.

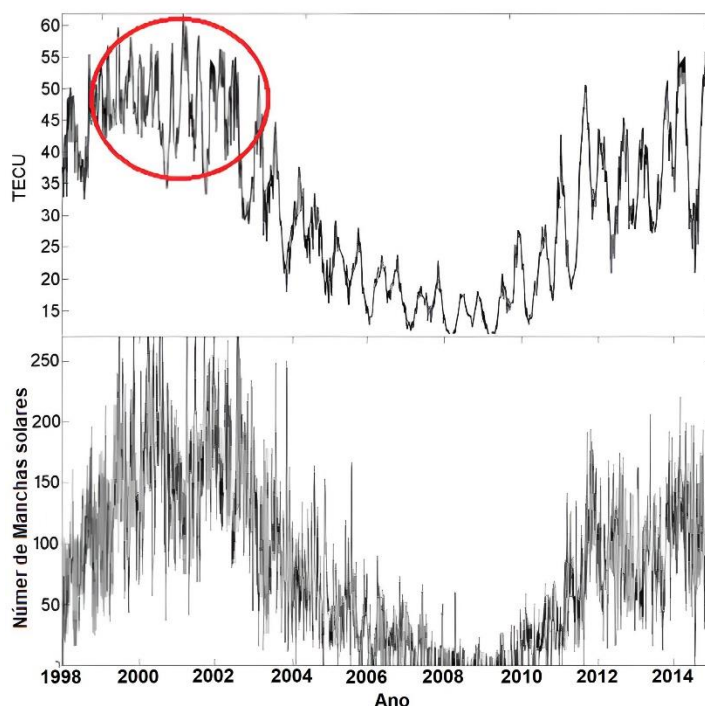
2.2.3 Variação do ciclo solar

Sabe-se que, além das emissões regulares de radiação eletromagnética, o Sol emite um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas, denominado vento solar. A intensidade do fluxo do vento solar pode variar conforme o ciclo solar e os processos físicos que ocorrem no Sol. Nesse contexto, Picanço (2019) cita que nos cinco últimos ciclos solares (ciclos 20 a 24), os valores típicos da intensidade do fluxo solar variaram entre ~60 e ~350 unidades de fluxo solar (SFU, do inglês Solar Flux Unit).

A dependência da ionosfera com as diferentes fases do ciclo solar fica clara ao compararmos os dados da quantidade de manchas solares e o TEC em função do tempo para parte dos ciclos solares 23 e 24, como mostra na figura 2.4.

Figura 2. 4. Evolução do TEC médio global e do número de manchas solares. O destaque em vermelho mostra as variações periódicas de menor escala devido a

rotação do Sol.



Fonte: Adaptado de Yoon e Park (2016)

O painel superior da figura 2.4 mostra os valores do TEC, em TEC units, medidos entre os anos de 1998 e 2014 sob a península coreana, o painel inferior da figura 2.4 mostra o número de manchas solares para o mesmo período. Observe que, apesar de ser claramente visível a correlação entre a quantidade de manchas solares e TEC, a correlação não é de 100%. Análises realizados por Liu e Chen (2009) e Liu et al. (2011), a fim de investigar efeitos da atividade solar sobre o TEC em escala global, compararam parâmetros tais como o fluxo de F10.7 e número de manchas solares e constataram que a melhor correlação com a variação do TEC global ocorre com o fluxo EUV, uma vez que o comprimento de onda responsável por mais ionizar constituintes neutros da ionosfera está na faixa desse espectro.

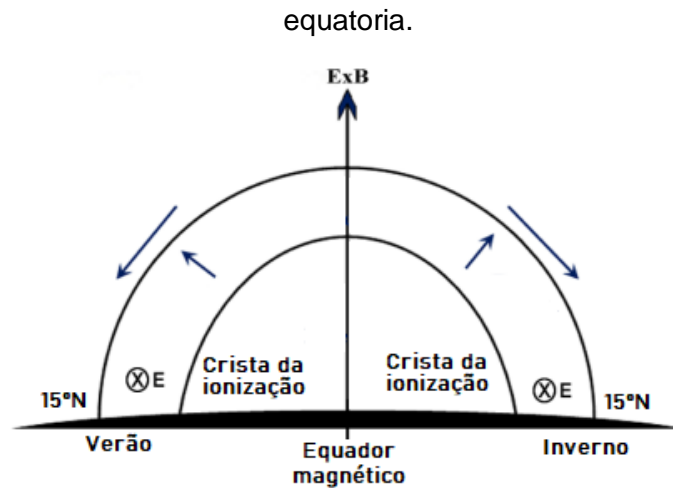
2.2.4 Variação latitudinal

A ionosfera também apresenta diferentes comportamentos em nível global. Por

isso, observando-se as similaridades e diferenças de algumas propriedades ionosféricas, é possível classificar a ionosfera em três regiões, de acordo com a latitude: região equatorial, região de médias latitudes e região de altas latitudes (MATSUOKA, 2007).

A região equatorial e de baixa latitude se encontram entre 30° N e 30° S de latitude magnética com a região equatorial se estendendo entre 5° N e 5° S e a região de baixa latitude se estendendo entre 5° N até os 30° N e entre 5° S até os 30° S. Essa região é caracterizada por apresentar alta taxa de ionização de modo que os maiores valores de TEC são encontrados nessa faixa de latitude. A ionosfera nessa região apresenta um comportamento característico de anomalia conhecida como anomalia de ionização equatorial (do inglês, equatorial ionization anomaly ou EIA), sendo o principal aspecto comum em latitudes baixas e equatoriais. A ionosfera localizada na região da EIA é altamente dinâmica e caracterizada por uma distribuição latitudinal da densidade de ionização que apresenta uma diminuição na concentração ionosférica do equador magnético e duas regiões de picos de densidade (cristas da anomalia) próximo às latitudes geomagnéticas 15° N e 15° S. (KELLEY, 2009). A figura 2.5 mostra que na camada F da região equatorial, o mecanismo básico do fenômeno EIA corre devido à configuração do campo elétrico, que é para leste durante o dia e produz uma deriva ascendente (deriva $E \times B$) levando a uma fonte de plasma (ou seja, efeito de fonte), como consequência o plasma se difunde ao longo das linhas do campo magnético sob a influência da força da gravitacional e do gradiente de pressão. O resultado geral desses processos é o aumento da densidade ionosférica em ambos os lados do equador magnético por volta de $\pm 15^{\circ}$ de latitude (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; JONAH, 2013, MATSOUKA, 2007, PIKANÇO, 2019; SEUN, 2021).

Figura 2. 5. Representação do efeito fonte e formação das cristas da anomalia



Fonte: Adaptado de Anderson e Roble (1981)

As regiões de médias latitudes localizam-se entre 30° N e 60° N de latitude magnética, e entre 30° S e 60° S de latitude magnética. Uma vez que o plasma é restrito a se mover ao longo das linhas de campo geomagnético, ventos neutros termosféricos transportam o plasma ao longo das linhas de campo para regiões de altitudes mais altas ou mais baixas nas quais as taxas de recombinação são diferentes, resultando em mudanças na densidade do plasma. Durante o dia, os ventos neutros tipicamente movem-se em direção aos polos levando o plasma para altitudes mais baixas, onde a taxa de recombinação é grande. Isso resulta em uma diminuição da altura de pico da camada F2 como também uma diminuição na densidade eletrônica de pico. De forma contrária, durante a noite, os ventos equatoriais tipicamente movem o plasma para cima. Desse modo, o mecanismo de recombinação do plasma diminui (JONAH, 2013; MATSOUKA, 2007; PIKANÇO, 2019).

As regiões de altas latitudes localizam-se acima de 60° N de latitude magnética e abaixo de 60° S de latitude magnética. Nessa região, as linhas do campo geomagnético são aproximadamente verticais, portanto, elas são responsáveis por conduzir as partículas carregadas da magnetosfera a descer para a atmosfera da Terra. Desse modo, essas partículas carregadas colidem com as partículas atmosféricas neutras causando aumentos locais na concentração de elétrons.

Como resultado, as partículas em aceleração perdem sua energia após a colisão. Consequentemente, alguns elementos que compõem a atmosfera são excitados para níveis de energia mais altos, levando-os à emissão de luzes visíveis, chamadas de luzes auroras. A intensidade do efeito dos ovais aurorais está relacionada ao nível de perturbações geomagnéticas, de modo que este efeito é estendido em direção ao equador na ocorrência de tempestades geomagnéticas mais intensas (JONAH, 2013; MATSOUKA, 2007; PICANÇO, 2019).

2.3. ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

Uma vez que o comportamento geomagnético é importante para a compreensão da dinâmica ionosférica, as subseções 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3 abordam os índices Dst / SYM-H, Kp e AE.

2.3.1 Índice Dst e SYM-H

Uma forma de quantificar a intensidade de uma perturbação magnética é através do índice Dst (do inglês Disturbance Storm Time) que mede o decréscimo da componente horizontal (H) do campo da Terra na superfície. Ele é calculado a partir de um conjunto de estações situadas em baixas latitudes distribuídas longitudinalmente obtendo, assim, um valor que é expresso de hora em hora em unidade de nanotesla (nT) (TSURUTANI; GONZALEZ, 1997; ROSTOKER, 1972). Os valores positivos fornecidos pelo índice Dst são usualmente consequência de uma compressão da magnetosfera gerada pelo aumento da pressão devido ao vento solar e, analogamente, os valores negativos representam uma expansão da magnetosfera de modo que, quanto mais negativo for o índice Dst, mais intensa é a perturbação geomagnética (FEDRIZZI, 2003; TSURUTANI e GONZALEZ, 1997; ROSTOKER, 1972).

É importante mencionar que há, também, um índice análogo ao Dst. O índice SYM-H pode ser utilizado com a mesma finalidade que o índice Dst, pois segue essencialmente as mesmas variações, com a vantagem de apresentar as varia-

ções de campo magnético com a resolução de 1 minuto. De modo geral, podemos assumir que o índice SYM-H é equivalente ao índice Dst com a vantagem de possuir maior resolução nos dados (WANLISS; SHOWALTER, 2006),

2.3.2 Índice Kp

Um outro índice que mede a atividade geomagnética mundial é o índice Kp (do alemão Planetarische Kennziffer ou índice planetário) que é obtido através de uma rede de observatórios entre 46° e 63°N e entre 46° e 63°S de latitude. Ele é projetado para expressar o grau de atividade ou perturbação geomagnética de toda a Terra, em intervalos de três horas através da diferença entre o maior e o menor valor observado na componente horizontal, do campo magnético (ROSTOKER, 1972; JUNIOR, 2002).

As perturbações na componente horizontal do campo magnético da Terra são quantificadas em uma escala com 28 níveis, variando de 0 (muito calmo) até 9 (muito perturbado) em que cada intervalo é subdividido em 3 partes. A tabela 2.1 mostra uma classificação proposta por Wrenn et al. (1987) com a finalidade de relacionar o estado momentâneo da atividade geomagnética com os valores do índice Kp.

Tabela 2. 1. Classificação da intensidade da perturbação do campo magnético usando o índice Kp.

Atividade Geomagnética	Faixa de Variação de Kp
Muito Calmo	$0 < Kp \leq 1$
Calmo	$1 < Kp \leq 2-$
Normal	$2- < Kp \leq 3+$
Perturbado	$3+ < Kp \leq 4+$
Muito Perturbado	$4+ < Kp \leq 9$

Fonte: Adaptado de Wrenn et al. (1987)

2.3.3 Índice AE

Os índices Dst e Kp medem o campo magnético da Terra a nível global, porém, o índice AE (do inglês Auroral Electrojet ou eletrojato auroral) é medido apenas na região auroral. Esse índice é obtido através de variações da componente horizontal do campo geomagnético H, coletadas em observatórios distribuídos uniformemente ao longo da região auroral no hemisfério norte (ROSTOKER, 1972; FEDRIZZI, 2003). Os dados do campo magnético coletados são normalizados tendo como referência um valor base mensal para cada estação. Esse valor base é calculado como a média de todos os dados obtidos da estação para os cinco dias mais calmos do mês para posteriormente ser subtraído dos novos dados encontrados (ROSTOKER, 1972).

2.4. PERTURBAÇÕES GEOMAGNÉTICAS

2.4.1 Tempestades Geomagnéticas

Na ocorrência de uma tempestade magnética, há uma considerável quantidade de energia proveniente do vento solar que é transferida para o sistema magnetosfera-termosfera-ionosfera. Esse transporte de energia produz um aumento na precipitação de partículas energéticas que intensifica os campos elétricos de convecção como também as correntes na ionosfera de altas latitudes. Como consequência do aumento da condutividade ionosférica, o fenômeno de aquecimento Joule e o arraste iônico na atmosfera superior polar afetam globalmente o comportamento e a estrutura da ionosfera e termosfera. Esse aquecimento resulta na expansão da termosfera em altas latitudes produzindo gradientes de pressão que produzem ventos neutros fluindo na direção equatorial. A circulação termosférica perturbada produzida é responsável por alterar a composição neutra e mover o plasma ao longo das linhas de campo magnético, modificando as taxas de produção e perda de íons e elétrons (FEDRIZZI, 2003; JONAH, 2013,

CARMO, 2018).

Por tanto, de forma geral, as perturbações que sucedem a ocorrência de uma tempestade geomagnética modificam as configurações de plasma em comparação com um dia calmo, resultando em tempestades ionosféricas. Nesse sentido, tempestades ionosféricas podem ser vistas como uma resposta às tempestades geomagnéticas (MENDILLO, 2006).

A tabela 2.2 mostra a classificação do tipo de tempestade magnética de acordo com o estabelecido em GONZALES et al., (1994).

Tabela 2. 2. Classificação da intensidade de tempestades magnéticas.

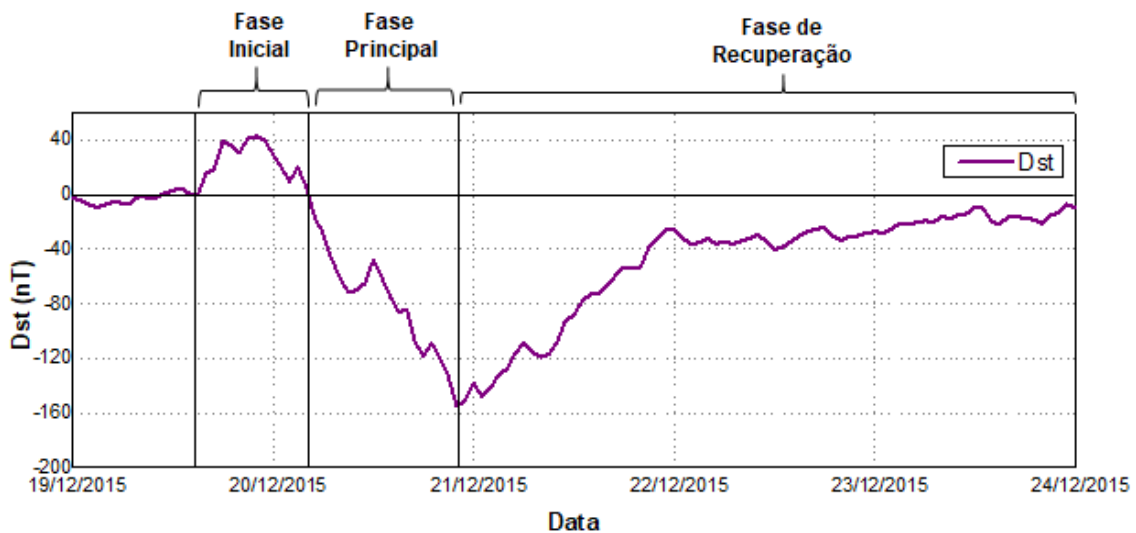
Intensidade da tempestade	Dst (nT)
Muito intensa	<-250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a -100
Fraca	-30 a -50

Fonte: (GONZALES et al., 1994)

Durante a ocorrência de algumas tempestades geomagnéticas é possível identificar, no início da tempestade, um súbito aumento no índice Dst antes de se verificar valores mínimos negativos. Tais valores positivos representam a fase inicial ou Início Súbito da Tempestade (ou do inglês Sudden Storm Commencement – SSC). O valor positivo que o SSC provoca no índice Dst é consequência do aumento da pressão dinâmica do vento solar sobre a magnetopausa no lado diurno. Apesar de poder ser observado em algumas tempestades, o SSC não é considerado como sendo um componente essencial da tempestade. Além do SSC, há um fenômeno semelhante conhecido como Sudden Impulse (SI) que, assim como o SSC, é verificado um aumento repentino do componente (H) do campo magnético, mas não é acompanhado de uma tempestade. Apesar dessa diferença, ambos os eventos possuem essencialmente os mesmos mecanismos físicos podendo ser chamados mutualmente de Sudden Commencement (SC) (GONZALES et al., 1994; JOSELYN; TSURUTANI, 1990).

A figura 2.6 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. 6. Curva do índice Dst de uma tempestade magnética.



Fonte: Produção do Autor

2.4.2 HILDCAAs

Outro tipo de atividade geomagnética que pode causar alteração no comportamento da ionosfera são as “atividades contínuas do índice AE, de longa duração e de grande intensidade” (do inglês “High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity” ou HILDCAAs).

A ocorrência de HILDCAAs está estreitamente relacionada com a formação de regiões de interação corrotante (do inglês Corotating Interaction Region, CIR) que são causadas principalmente por feixes de alta velocidades que emergem

de buracos coronais solares cuja frequência de ocorrência é maior fora do período de máximo solar (HAJRA et al., 2013). Quando um feixe de baixa velocidade encontra um feixe de alta velocidade saído de um buraco coronal, a interação entre esses dois fluxos resulta em regiões de campo magnético intenso. Essas regiões são então denominadas CIR.

As flutuações do campo magnético interplanetário (ou do inglês, interplanetary magnetic field IMF) na direção sul presentes nas CIRs através de reconexão magnética são responsáveis por causar transferência de energia e precipitação de partículas energéticas para a magnetosfera. Essa transferência contínua de energia e partículas é responsável por retardar o decaimento normal da corrente de anel¹, fazendo que o campo magnético da Terra demore a voltar ao comportamento de dia calmo. (TSURUTANI E GONZALEZ, 1987; SORAAS et al., 2004).

Para um evento ser classificado como HILDCAA é necessário cumprir alguns critérios. Tsurutani e Gonzalez (1987) definiram o seguinte conjunto de critérios para classificar um evento como HILDCAA:

1. O evento deve alcançar o valor mínimo de 1000 nT no índice AE;
2. O evento deve durar, no mínimo, dois dias;
3. O índice AE não deve ser inferior 200 nT por mais de duas horas seguidas;
4. O evento deve ocorrer fora da fase principal das tempestades magnéticas.

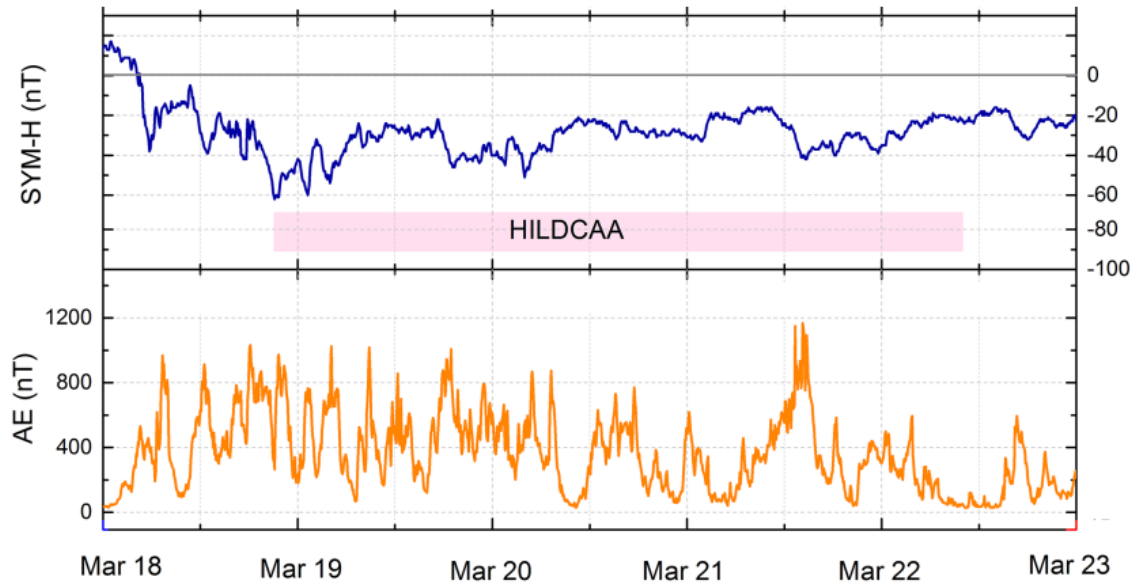
Posteriormente, os próprios autores (TSURUTANI, et al., 2004) consideraram os critérios de classificação muito restritivos. Desse modo, um evento pode ser classificado como HILDCAA mesmo que um ou mais critérios listados inicialmente não sejam estritamente seguidos.

A figura 2.7 apresenta um exemplo de HILDCAA que ocorreu entre os dias 18 e 22 de março de 2006. No painel inferior da figura é representado o índice AE enquanto que no painel superior é mostrado o índice SYM-H, a faixa na cor rosa indica o período que a HILDCAA durou de modo que, durante a ocorrência de todo o evento HILDCAA, é possível visualizar que o índice AE registra valores

¹ Corrente de anel é uma corrente elétrica em forma de toroide que flui em torno da Terra no plano equatorial (mais detalhes em Akasofu e Chapman, 1961).

elevados e o índice SYM-H apresenta uma longa recuperação até atingir os valores ordinários.

Figura 2. 7. Exemplo do comportamento dos índices SYM-H e AE durante a ocorrência de HILDCAA.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017).

3. METODOLOGIA E DADOS

Neste capítulo trataremos sobre os dados utilizados nesse trabalho, os instrumentos usados para a obtenção dos dados e como esses dados foram trabalhados.

3.1. BANCO DE DADOS

Previamente, no ciclo de Iniciação Científica 2020-2021 (Processo CNPq: 123663/2021-0), foi elaborado um catálogo de tempestades geomagnéticas e HILDCAAs ocorridos durante a fase descendente do ciclo solar 24, que durou de abril de 2014 até dezembro de 2019. 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 de HILDCAAs é finalizado no mês de

fevereiro de 2018.

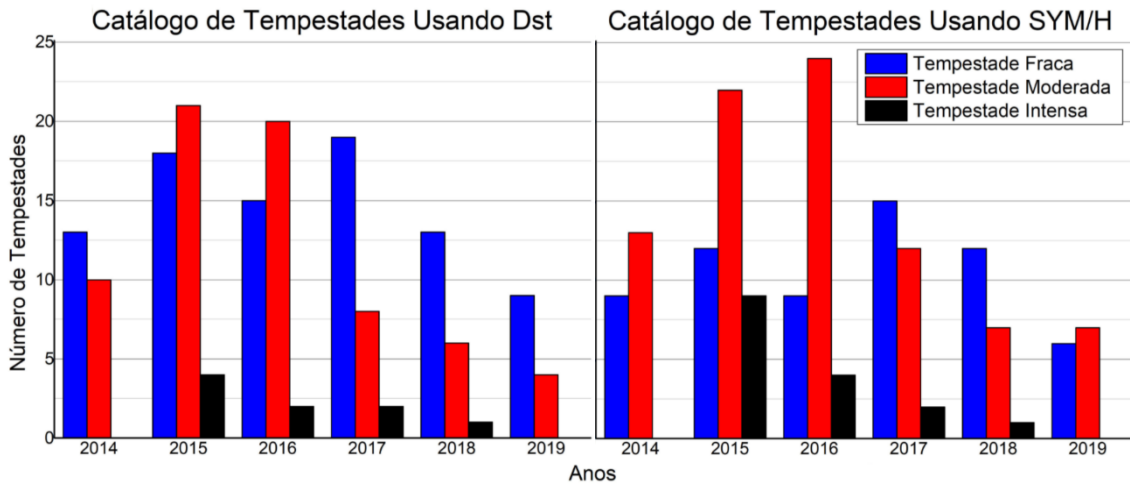
O motivo para a escolha da fase descendente do ciclo solar para a elaboração dos catálogos é devido este ser o período de maior ocorrência de eventos HILDCAA, uma vez que estão estreitamente relacionados com a formação de regiões de interação corrotante.

O catálogo das tempestades geomagnéticas foi elaborado, inicialmente, através do desenvolvimento de um software que detecta os instantes em que o índice Dst é menor que -100 nT, entre -100 nT e -50 nT e entre -49 nT e 30 nT a fim de classificar cada tempestade segundo os critérios 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 tendo por base o índice Dst é mostrado no painel esquerdo da figura 3.1. Contudo, no intuito de aumentar a precisão dos catálogos, novos catálogos foram elaborados, desta vez utilizando o índice SYM-H.

De acordo com Wanliss e Showalter (2006), o índice SYM-H pode ser considerado equivalente ao índice Dst com a vantagem de possuir uma maior resolução nos dados possibilitando visualizar, com clareza, fenômenos que possuem efeito na Corrente de Anel e não são possíveis de detectar com um índice de resolução horária. Por isso, todas as tempestades geomagnéticas catalogadas com o índice Dst foram analisadas novamente com o índice SYM-H. A quantidade de tempestades geomagnéticas separadas por suas respectivas intensidades usando o índice SYM-H é mostrada no painel direito da figura 3.1.

Figura 3. 1. Tempestades geomagnéticas catalogadas.



Fonte: Produção do Autor

Anteriormente, com o índice Dst, tinham sido catalogadas 87 tempestades fracas, 69 tempestades moderadas, 9 tempestades intensas e nenhuma tempestade muito intensa ou supertempestade, totalizando 165 tempestades geomagnéticas. Atualmente, usando o índice SYM-H, foram catalogadas 63 tempestades fracas, 85 tempestades moderadas, 16 tempestades intensas e nenhuma tempestade muito intensa, totalizando 164 tempestades geomagnéticas.

Observe que, apesar de algumas diferenças no número de tempestades fracas, moderadas e intensas, nenhuma tempestade muito intensa ($Dst < -250$ nT ou $SYM-H < 250$ nT) foi registrada durante toda a fase descendente do ciclo solar 24. Esse resultado está em conformidade com o publicado por Hajra (2021) que, ao comparar o ciclo solar 24 com os quatro ciclos solares anteriores, verificou que o último ciclo solar foi o mais fraco em magnitude entre os cinco ciclos solares e o único que não apresentou ocorrências de tempestades muito intensas.

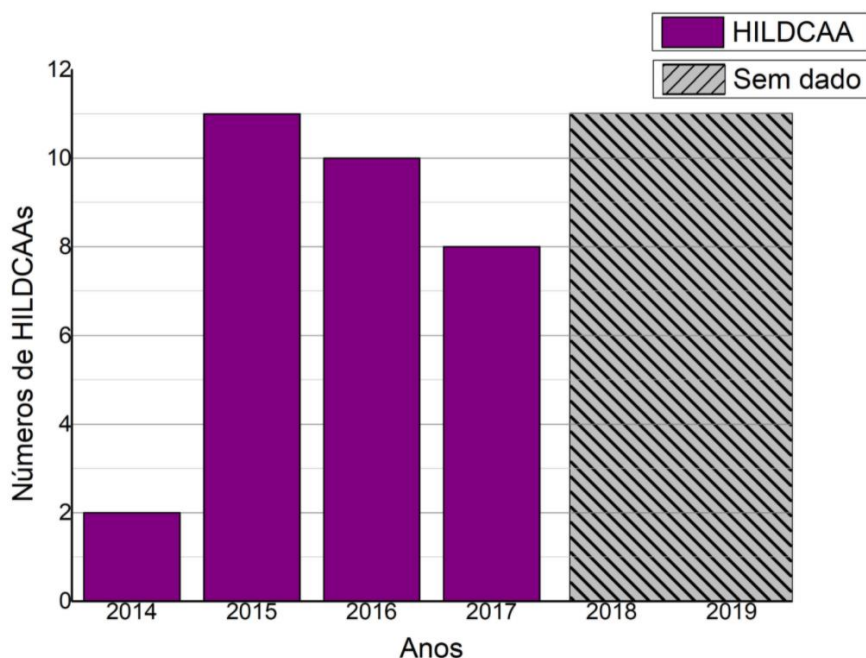
De forma semelhante ao catálogo de tempestades geomagnéticas, o catálogo de eventos HILDCAAs foi elaborado, inicialmente, através do desenvolvimento de um outro software tendo por base o programa criado por Lamin et al. (2020). O software desenvolvido, após detectar um valor de índice AE maior que 1000 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 para identificar HILDCAAs foi flexibilizado podendo ser inferior a 200 nT por mais de 4 horas. Tal flexibilização é possível devido os critérios inicialmente propostos para classificar HILDCAAs serem arbitrários. Tsurutani et al. (2004) relataram que os processos físicos durante HILDCAAs podem ocorrer, mesmo na ausência de um dos critérios.

É importante mencionar que o catálogo dos intervalos HILDCAA também foi validado manualmente, no intuito de evitar a contabilização de falsos positivos.

A figura 3.2 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 3. 2. Eventos HILDCAAs catalogadas.



Fonte: Produção do autor.

3.1.1 Dia calmo de referência

A fim de quantificar o grau de perturbação em um dia geomagneticamente perturbado, faz-se necessário compará-lo com um dia de referência, chamado de

dia calmo de referência. Na realidade, a referência para o dia calmo foi elaborada a partir da média dos valores do TEC para os três dias mais calmos do mês de ocorrência da perturbação, de acordo com o índice Kp (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). A lista dos dias utilizados pode ser conferida no Apêndice A.

3.2. INSTRUMENTAÇÃO

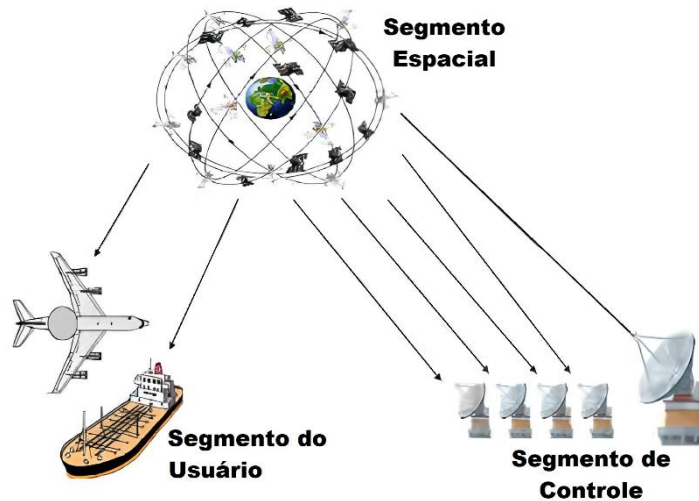
3.2.1 Satélites GNSS

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 3.3 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 órbitas 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. 3. Os diferentes segmentos do sistema GPS.



Fonte: Adaptado de Jonah (2013)

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, 2008). 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
10,23MHz	$10,23MHz \times 154$ $= 1,57542GHz$	$10,23MHz \times 120$ $= 1,2276GHz$

Fonte: (MONICO, 2008).

A utilização de duas frequências distintas pelos satélites, L1 e L2, permite a correção de erro do sistema GPS devido a refração ionosférica (MONICO, 2008).

3.2.2 RBMC

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) é um conjunto de estações geodésicas equipadas com receptores GNSS de alto desempenho que, dependendo da estação selecionada para estudo, pode fornecer uma resolução de dados praticamente contínua (IBGE, 2022a). Os dados são disponibilizados para serem baixados no formato padrão RINEX para dados de GPS no site do IBGE (IBGE, 2022a).

Atualmente, a RBMC conta com 136 estações operantes, 9 estações inoperantes e 3 estações em estado de advertência, totalizando 148 Estações sem contar as estações inativas (IBGE, 2022b). As estações são classificadas como inoperantes quando ficam sem emitir dados por mais de 6 dias, já as estações em estado de advertência passaram por uma atualização de hardware e as estações operantes enviam dados normalmente.

A figura 3.4 mostra a atual situação operacional das estações de receptores de sinais GNSS da RBMC. Os pins vermelhos, amarelos e verdes representam as estações inoperantes, em estado de advertência e operantes, respectivamente.

Figura 3. 4. Localização de todas as estações da RBMC.



Fonte: IBGE (2022b)

A fim de analisar o comportamento do TEC para duas latitudes diferentes, foram escolhidas a estação equatorial de São Luís – chamada de SALU, localizada a $-02^{\circ} 35' 36,45410''$ de latitude, $-44^{\circ} 12' 44,92406''$ de longitude e 18,984 m de altitude – e a estação de baixa latitude de Cachoeira Paulista – chamada de CHPI, localizada a $-22^{\circ} 41' 13,72659''$ de latitude, $-44^{\circ} 59' 6,56989''$ de longitude e 617,415 m de altitude. A figura 3.5 destaca a localização das duas estações selecionadas no estudo.

Figura 3. 5. Localização das estações selecionadas para estudo.



Fonte: Adaptado de IBGE (2022b)

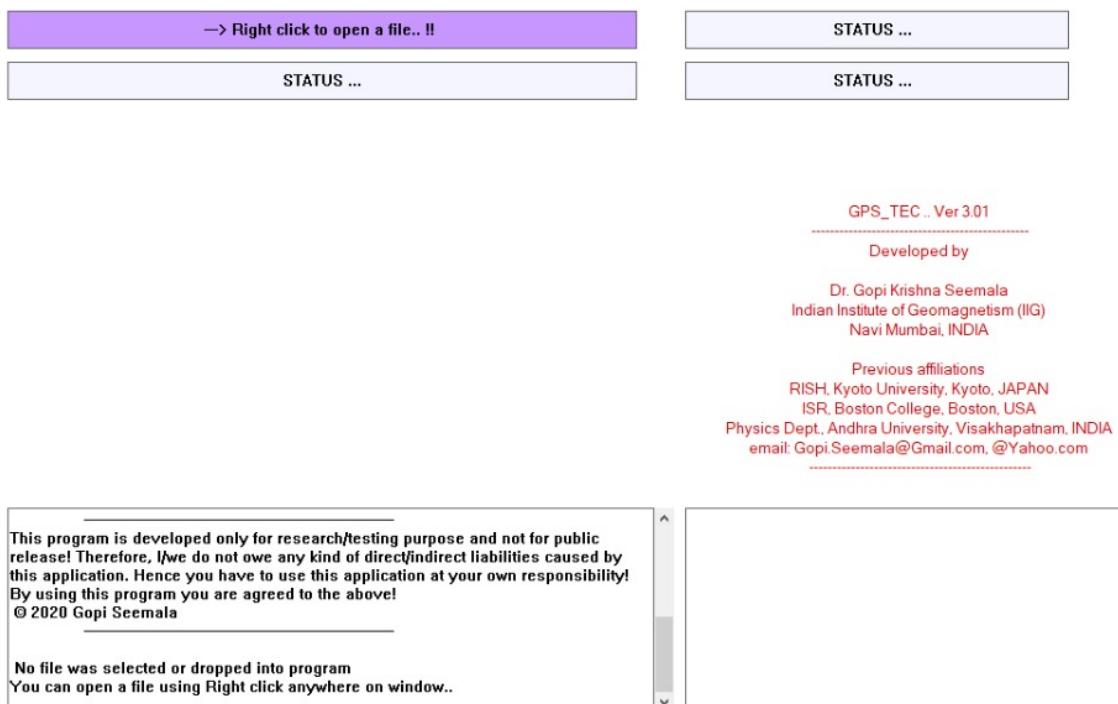
Para o estudo, foram selecionados os arquivos RINEX que correspondem aos dias de tempestade, aos dias de eventos HILDCAA e aos 3 dias mais calmos de cada mês. Para o processamento dos arquivos RINEX fez-se o uso do programa GPS-TEC Analysis version 3.

3.3. GPS-TEC ANALYSIS VERSION 3

O programa GPS-TEC Analysis version 3 é uma ferramenta computacional usada para derivar os dados GPS-TEC dos arquivos de observação RINEX 2.1 e RINEX 3.02. A ferramenta foi desenvolvida pelo Dr. Gopi Krishna Seemala e disponibilizada por ele através do site <https://seemala.blogspot.com/>. Atualmente o programa suporta apenas derivação do TEC de satélites GPS, os dados de TEC de outros GNSS serão incluídos em atualizações futuras.

Ao ser executado, o programa automaticamente espera que o usuário entre com os arquivos RINEX exibindo a interface mostrada na figura 3.6

Figura 3. 6. Interface do programa GPS-TEC Analysis version 3.



Fonte: Produção do autor

Após selecionar o arquivo RINEX como input do programa, o GPS-TEC Analysis 3 gera alguns arquivos de saída. Dentre os arquivos de saída criados os principais arquivos são os arquivos de saída ASCII com extensões * .Cmn e * .Std.

O arquivo com extensão * .Cmn é mostrada na figura 3.7 e, em seu cabeçalho, apresenta o código da estação bem como a latitude, longitude e altitude da estação. O código “salu” significa a estação de São Luís, por exemplo. As colunas informam, respectivamente, 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 3. 7. Exemplo do arquivo de saída com extensão *.Cmn.

salu, Brasil										
-2.59346 315.78752 18.97951										
MJdatet	Time	PRN	Az	Ele	Lat	Lon	Stec	Vtec	S4	
56779.000000	-24.000000	1	335.00	53.98	-0.655	314.884	7.94	8.56	-99.000	
56779.000174	0.004167	1	335.14	53.88	-0.646	314.885	7.89	8.52	-99.000	
56779.000347	0.008333	1	335.27	53.79	-0.637	314.887	7.89	8.51	-99.000	
56779.000521	0.012500	1	335.41	53.69	-0.628	314.888	7.87	8.49	-99.000	
56779.000694	0.016667	1	335.54	53.59	-0.619	314.890	7.86	8.47	-99.000	
56779.000868	0.020833	1	335.67	53.49	-0.610	314.891	7.85	8.46	-99.000	
56779.001042	0.025000	1	335.80	53.39	-0.601	314.893	7.82	8.43	-99.000	
56779.001215	0.029167	1	335.94	53.30	-0.592	314.894	7.83	8.42	-99.000	
56779.001389	0.033333	1	336.07	53.20	-0.583	314.896	7.80	8.39	-99.000	
56779.001563	0.037500	1	336.20	53.10	-0.574	314.897	7.79	8.38	-99.000	
56779.001736	0.041667	1	336.33	53.00	-0.565	314.899	7.78	8.36	-99.000	
56779.001910	0.045833	1	336.46	52.90	-0.556	314.900	7.75	8.33	-99.000	

Fonte: Produção do autor

O arquivo com extensão *.Std é mostrado na figura 3.8 onde as colunas indicam, na ordem em que aparecem, o tempo em UTC fracionado, a média do TEC, o desvio padrão do TEC e a latitude da estação.

Figura 3. 8. Exemplo do arquivo de saída com extensão *.Std.

0.000	10.19	1.28	-2.59
0.017	10.14	1.16	-2.59
0.033	10.10	1.19	-2.59
0.050	10.06	1.18	-2.59
0.067	10.01	1.18	-2.59
0.083	9.96	1.19	-2.59
0.100	9.90	1.14	-2.59
0.117	9.85	1.12	-2.59
0.133	9.79	1.13	-2.59
0.150	9.73	1.14	-2.59
0.167	9.67	1.17	-2.59
0.183	9.61	1.16	-2.59
0.200	9.55	1.16	-2.59
0.217	9.48	1.17	-2.59
0.233	9.41	1.25	-2.59
0.250	9.34	1.17	-2.59
0.267	9.27	1.25	-2.59

Fonte: Produção do autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

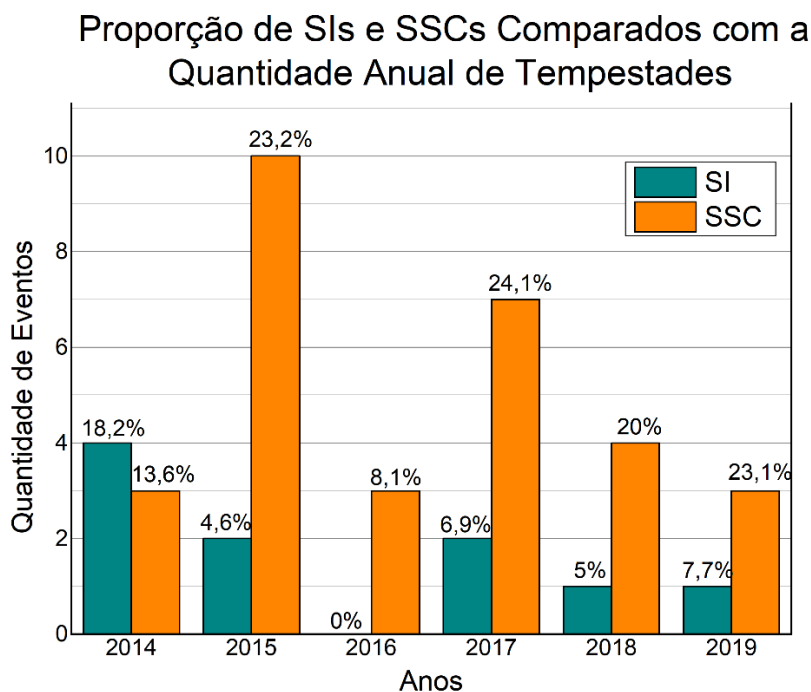
Este capítulo é dividido em três partes, onde cada parte é dedicada a uma análise distinta. A primeira parte destina-se a verificar possíveis correlações entre as quantidades anuais de tempestades magnéticas com as quantidades anuais de Storm Sudden Commencements (SSCs) e Sudden Impulses (SIs); a segunda parte examina a característica da dependência do ciclo solar presente no nosso banco de dados; e a terceira parte é dedicada à análise das respostas latitudinais comparando os resultados entre as estações de SALU e CHPI.

4.1. PROPORÇÃO ENTRE TEMPESTADES CATALOGADAS E SSCs/SIs

A importância da identificação de um Sudden Commencement (SC) como um (Storm Sudden Commencement) SSC se dá pelos mecanismos e “drives” responsáveis pela tempestade magnética. No que diz respeito as estruturas interplanetárias associadas a cada assinatura de evento, a maioria dos SSCs estão relacionados a choques, enquanto que a maioria dos SIs estão relacionados a passagens de descontinuidade tangenciais (JOSELYN; TSURUTANI, 1990).

Para averiguar a proporção de SIs e SSCs associadas as tempestades catalogadas que ocorreram para cada ano foi utilizado o banco de dados de SCs disponibilizado pelo Observatório de Ebre através do site: <https://www.obsebre.es/en/rapid>. A figura 4.1 mostra, com a cor ciano, a quantidade de SIs anuais e, com a cor laranja, está representada a quantidade de SSCs anuais. Sobre cada coluna é mostrada a porcentagem de ocorrências de SSCs ou SIs em relação ao total de tempestades catalogadas no respectivo ano.

Figura 4. 1. Quantidade e proporção de eventos SSCs e SIs; as porcentagens sobre as colunas indicam a proporção de ocorrências de SSCs ou SIs em relação ao total de tempestades em dado ano.



Fonte: Produção do autor

Na figura 4.1, para o ano de 2014, só foram consideradas SSCs e SIs após o início da fase descendente do ciclo solar, ou seja, apenas eventos que ocorreram depois do mês de abril. Como a quantidade de SSCs e SIs estão associadas ao nível de atividade solar (JOSELYN; TSURUTANI, 1990), espera-se que a figura 4.1 apresente uma maior quantidade de SCs no início da fase descendente do que no final. De fato, tendo em vista que foram considerados apenas eventos a partir de abril de 2014, os SCs ocorreram em maior quantidade próximo do máximo de atividade solar, apesar da quantidade anual de SCs não ter diminuído linearmente com a fase descendente do ciclo solar. Essa não linearidade pode ser explicada por Echer et al. (2003) e Echer et al. (2005) que, ao analisarem a

correlação entre vários parâmetros interplanetários como pressão, velocidade e densidade do vento solar com a ocorrência de SIs, constataram que o parâmetro que possui a melhor correlação com a ocorrência de SIs é a raiz quadrada da variação da pressão dinâmica, que leva em consideração critérios como a variação da densidade do plasma e da velocidade do vento solar, que não variam necessariamente de forma linear durante as fases do ciclo solar.

Com respeito as porcentagens de SSCs e SIs em relação ao total de tempestades catalogadas, observa-se que, anualmente, cerca de 26% das tempestades magnéticas estão relacionadas a ocorrência de SCs, além de que foram detectadas, no geral, mais SSCs do que SIs. Obridko et al (2013), ao analisarem 2507 tempestades geomagnéticas que ocorreram entre 1950 e 2010, chegaram à conclusão de que 24% dessas tempestades estavam relacionadas a ocorrência de SCs, proporção próxima a que obtivemos.

4.2. ANÁLISE DE DEPENDÊNCIA DO CICLO SOLAR

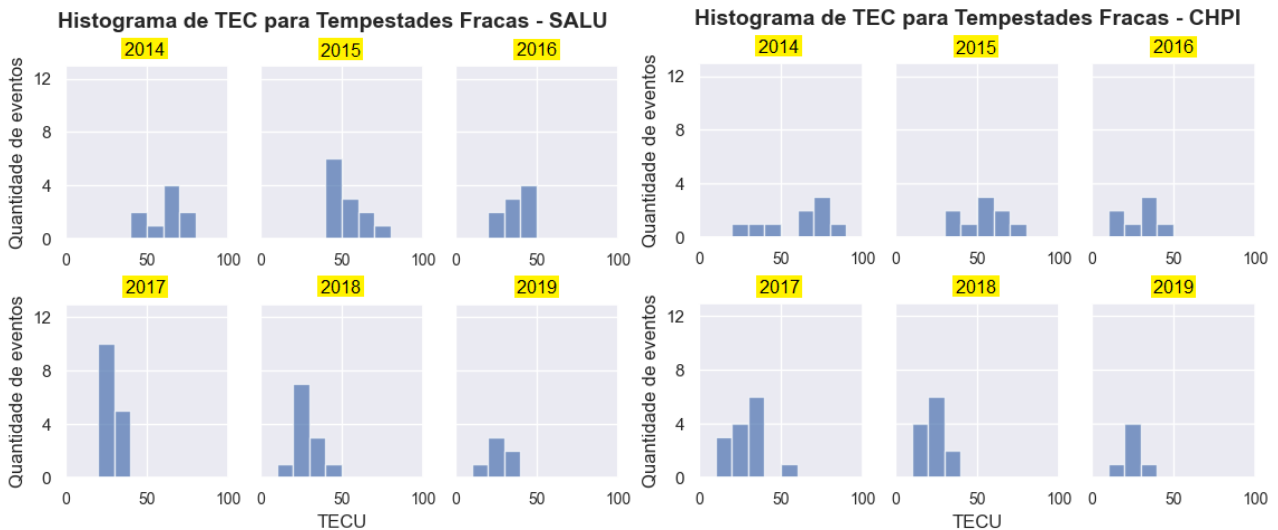
Para averiguar a dependência do TEC durante as perturbações geomagnéticas com o ciclo solar, separamos os resultados em quatro diferentes tipos de eventos, tempestades fracas, moderadas, intensas e HILDCAAs, os quais podem ser vistos nos tópicos seguintes.

4.2.1. Tempestades fracas

Os maiores valores de TEC obtidos para as tempestades fracas nas estações de SALU e CHPI são mostrados na figura 4.2. O lado esquerdo da figura apresenta os dados obtidos para SALU enquanto o lado direito apresenta os dados para CHPI. Todos os painéis mostram histogramas em que o eixo y indica a quantidade de tempestades e o eixo x indica o máximo TECU alcançado durante o evento. Em outras palavras, as informações obtidas são mostradas usando uma distribuição de frequências em que a base de cada uma das barras representa o intervalo de valores em que os dados são obtidos e a altura da barra indica quantas vezes esse resultado foi obtido. Para manter a uniformidade em

todos os histogramas, o eixo x, que representa a distribuição contínua em TECU, foi dividido em 10 partes iguais de 10 TECU cada, de modo que os valores são classificados de 0 TECU até 100 TECU.

Figura 4. 2. Histograma para as tempestades fracas nas estações de SALU e CHPI.



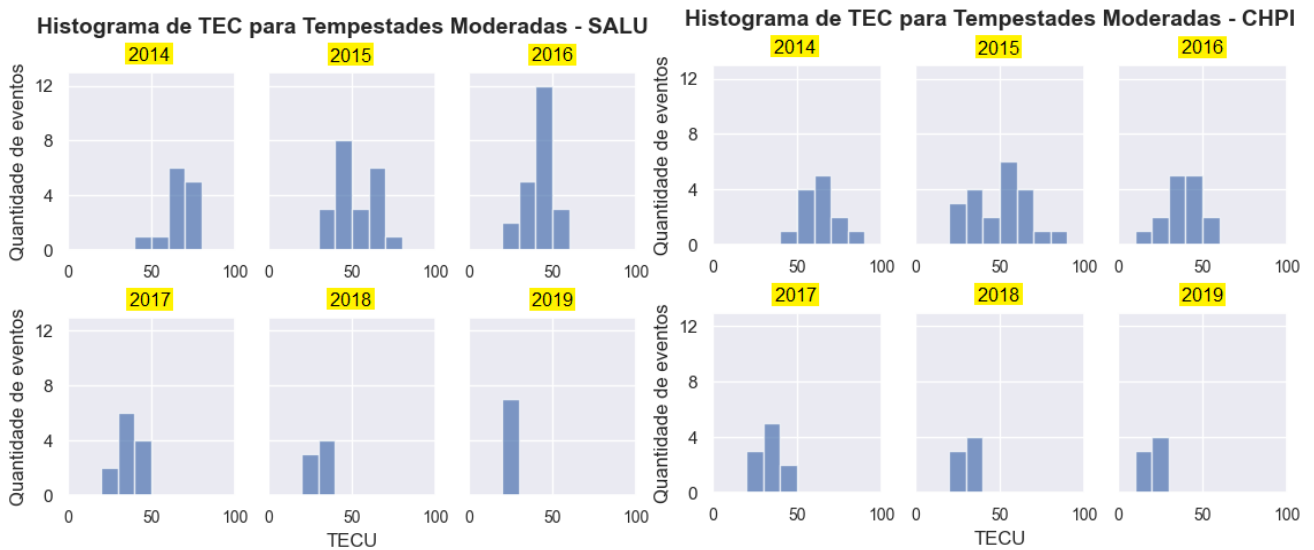
Fonte: Produção do autor

Podemos perceber que as duas estações em estudo tiveram eventos com maiores valores do TEC durante os anos 2014 e 2015, i.e, os dois primeiros anos do início da fase descendente do ciclo solar, enquanto que nos anos de 2018 e 2019 os eventos apresentaram menores valores. Podemos analisar essa característica com foco na distribuição dos eventos, uma vez que nos anos de 2014 e de 2015 as colunas estão localizadas mais à direita da mediana do eixo x no histograma, enquanto que com o passar dos anos a distribuição dos eventos migra para valores à esquerda da mediana. Esse comportamento indica que apesar de analisar as respostas do TEC ionosférico para um mesmo tipo de classificação de tempestade, o período de ocorrência da tempestade influencia nos valores do TEC.

4.2.2 Tempestades moderadas

A figura 4.3 mostra os máximos valores do TEC para as tempestades moderadas nas estações de SALU e CHPI.

Figura 4. 3. Histograma para as tempestades moderadas nas estações de SALU e CHPI.



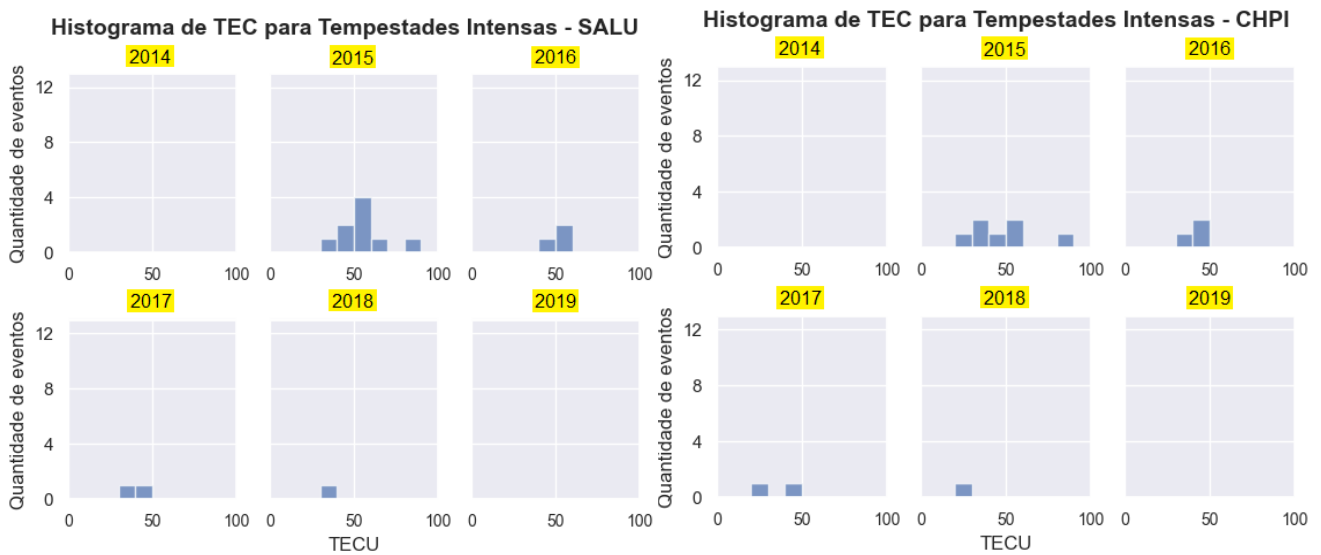
Fonte: Produção do autor

A figura 4.3 aponta que ambas as estações alcançaram valores de TEC superiores a 50 TECU nos três primeiros anos da fase descendente do ciclo solar, enquanto que nos dois últimos anos as estações atingiram, no máximo, 40 TECU. Comparando as estações, podemos notar que tantos os maiores valores (ocorridos nos anos de 2014 e 2015), quanto os menores valores (medidos em 2019) ocorreram na estação de CHPI. Tal aumento na quantidade de elétrons na região de baixa latitude, durante tempestades magnéticas, pode ser causado pela penetração de campos elétricos magnetosféricos que podem intensificar o efeito fonte com cristas mais proeminentes que aquelas dos períodos calmos.

4.2.3 Tempestades intensas

A figura 4.4 é semelhante as figuras 4.2 e 4.3, porém para tempestades intensas.

Figura 4. 4. Histograma para as tempestades intensas nas estações de SALU e CHPI.



Fonte: Produção do autor

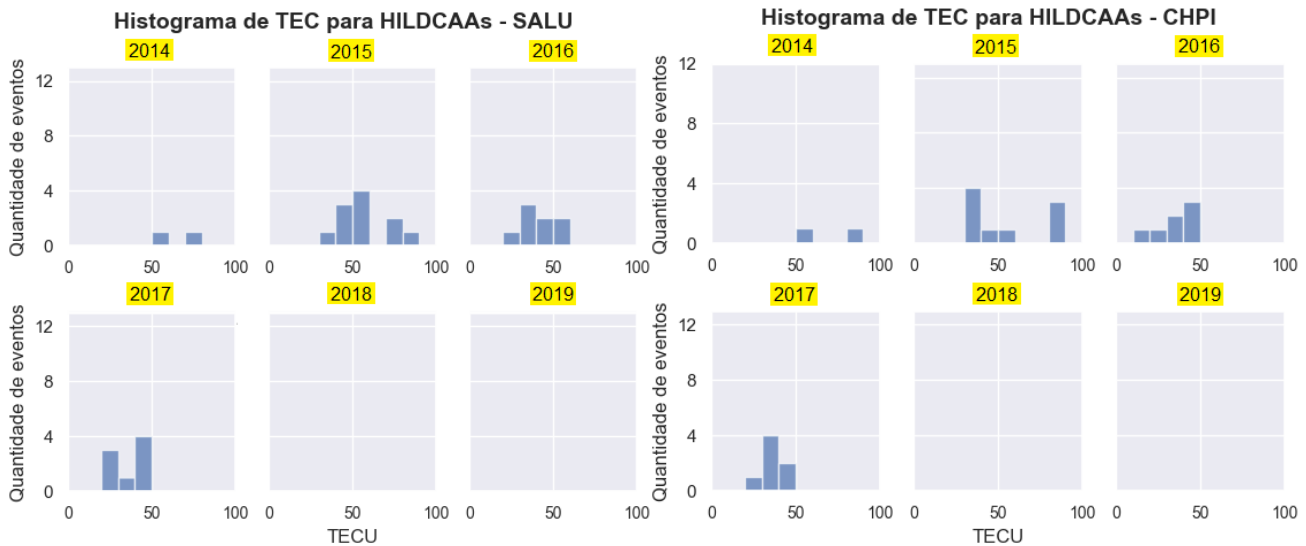
Conforme mencionado anteriormente, não foram catalogadas tempestades intensas nos anos de 2014 e 2019 (ver figura 3.1). Hajra (2021) em seu estudo sobre as características geomagnéticas do ciclo solar 24 em comparação com os ciclos anteriores desde o ciclo 20, mostrou que o ciclo 24 é o mais fraco em magnitude energética no acoplamento vento solar-magnetosfera. Como consequência, o número de tempestades geomagnéticas e HILDCAAs foi reduzido. Em relação a tempestades intensas, a redução em comparação aos ciclos anteriores oscilou entre 49 – 75%, além de nenhuma supertempestade ter sido detectada. Tamanho redução das tempestades intensas é condizente com o fato de poucas terem sido identificadas durante o período abordado na elaboração do catálogo (fase descendente). Em relação ao conteúdo eletrônico durante tais tempestades, os maiores valores ocorreram no ano de 2015 para ambas as estações e os menores valores foram registrados nos anos de 2017 e 2018 na estação de CHPI.

Analisando de forma ampla, podemos notar que independente da intensidade da tempestade geomagnética, i. e., da classificação a qual ela pertença, o período em que ela ocorre dentro do ciclo solar é absolutamente importante nos efeitos que serão causados na densidade eletrônica da ionosfera.

4.2.4 HILDCAAs

A figura 4.5 apresenta os máximos valores do TEC obtidos nas estações em estudo para os eventos HILDCAA.

Figura 4. 5. Histograma para HILDCAAs nas estações de SALU e CHPI.



Fonte: Produção do autor

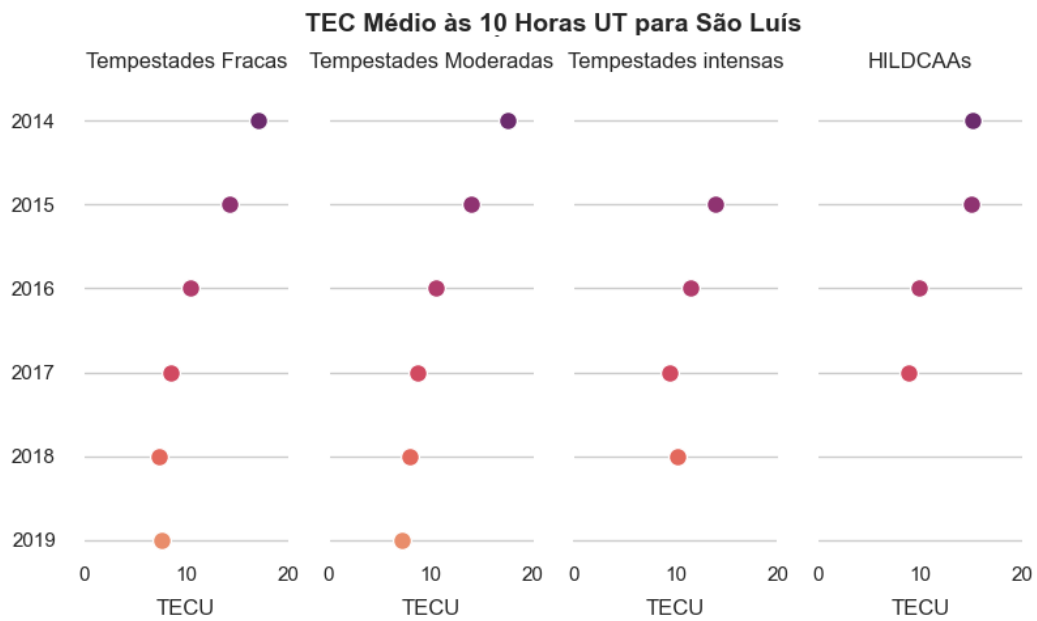
Conforme mencionado anteriormente, o catálogo de HILDCAAs abrange os anos entre 2014 e 2017 (ver figura 3.2). O ano de 2015 possui a maior quantidade de HILDCAAs e também foi o ano que apresentou os maiores valores de TEC em ambas as estações. O menor valor de TEC ocorreu na estação de CHPI no ano de 2016. Recentemente, Silva et al. (2020) analisaram a dinâmica da ionosfera através do TEC durante intervalos HILDCAA e, além de constatar que os valores máximos do TEC ocorriam na estação de baixa latitude, também observaram que os menores valores de TEC foram registrados em CHPI, de modo que os valores de dTEC têm maior magnitude para a estação GNSS de baixa latitude. Isso pode ocorrer devido influência de campos elétricos de penetração imediata que possuem como um dos principais mecanismos a elevação da ionosfera e intensificação do efeito fonte que aumenta o TEC nas regiões próximas as cristas da anomalia.

De forma geral, um aspecto importante a ser levado em conta é que é conhecida a relação do TEC com o ciclo solar. Porém, é importante ressaltar que esta característica surgiu nos resultados referentes ao trabalho corrente mesmo em um relativo curto intervalo de tempo que corresponde a fase descendente do ciclo solar. Essa característica é evidente mesmo em tempestades fracas, de modo que uma tempestade fraca possui resposta mais forte no TEC no início da fase descendente do que no final.

Os resultados deste trabalho estão de acordo com o estudo realizado por Lekshmi et al. (2011), que ao analisarem dados do índice Dst de 584 tempestades geomagnéticas e a densidade eletrônica de pico ($N_{m\max}$) em duas estações durante dois ciclos solares inteiros, verificou que a ocorrência das tempestades ionosféricas em geral depende da fase do ciclo solar. Liu e Chen (2009) e Liu et al. (2011), de forma complementar, compararam os dados de XUV (do inglês, eXtreme UltraVioleta ou Ultra Violeta Extremo), raios-X, número de manchas solares, F10.7 (fluxo de rádio solar no comprimento de onda de 10,7 cm), como parâmetros solares que afetam o comportamento ionosférico, e constataram que o TEC global possui características lineares de dependência com esses “solar proxies” em níveis baixos e moderados de atividade solar, embora a linearidade seja perdida em um nível de atividade mais intensa. Isto é, esperava-se que os valores de TEC diminuam com a diminuição da atividade solar como foi observado em nosso estudo.

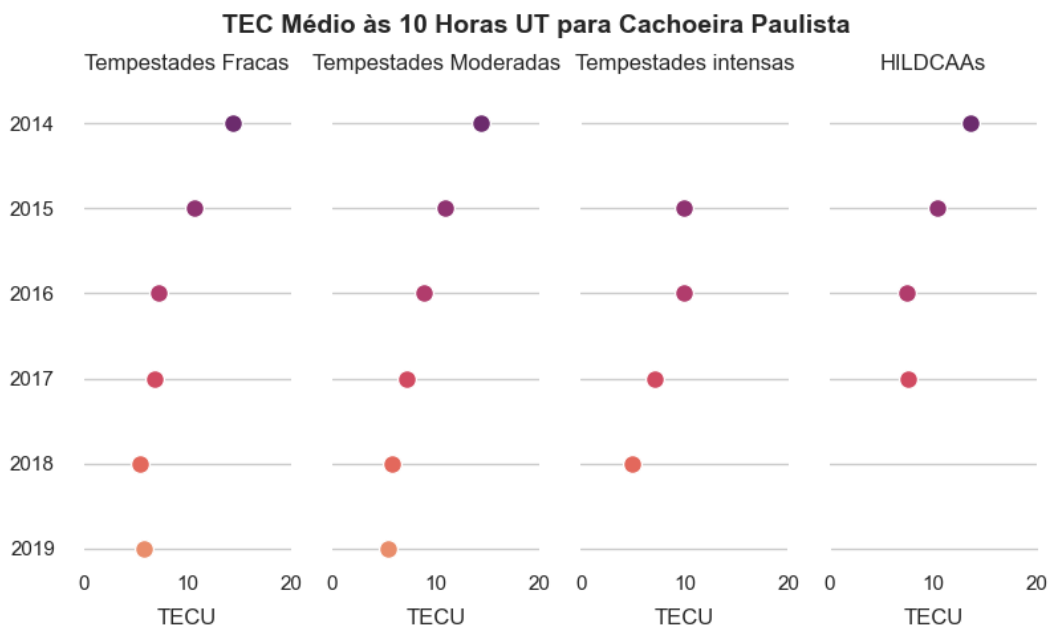
De modo a demonstrar o quanto está presente nos resultados a dependência do ciclo solar apresentada pelo TEC, foi realizada uma média aritmética do TEC obtido às 10 horas UT (7 LT) de todas as perturbações geomagnéticas estudadas aqui, obedecendo às respectivas classificações e estações de ocorrência. As figuras 4.6 e 4.7 apresentam os valores médios do TEC para as estações de SALU e CHPI, respectivamente. Nessas duas figuras, as colunas indicam o tipo de evento (tempestade fraca, moderada, intensa ou HILDCAA), as linhas mostram o respectivo ano em que o TEC foi obtido, os eixos x com um círculo colorido indicam o valor médio do TEC registrado às 10 horas UT. Não há dados para os eixos x sem círculos.

Figura 4. 6. Valores médios de TEC medidos às 10 horas UT na estação de SALU.



Fonte: Produção do autor

Figura 4. 7. Valores médios de TEC medidos às 10 horas UT na estação de CHPI.



Fonte: Produção do autor

As figuras 4.6 e 4.7 mostram de maneira mais clara que há uma forte dependência do TEC com o ciclo solar para todos os tipos de tempestades e HILDCAAs,

e que esta característica se manifesta mesmo em um estudo de poucos anos (um quarto do ciclo solar). De acordo com Negreti (2012), no máximo solar a variação do TEC pode chegar a 100% em relação aos valores do mínimo solar, as figuras 4.6 e 4.7 mostram que, ao comparar o primeiro e o último ano da fase descendente, a média do TEC registrada às 10 UT para as tempestades magnéticas fracas e moderadas alcançam uma variação próxima a mencionada por Negreti (2012).

4.3. ANÁLISE SOBRE AS RESPOSTAS LATITUDINAIS

As figuras 4.8 e 4.9 mostram os valores do TEC correspondentes as estações de SALU e CHPI, respectivamente. O TEC de todas as tempestades foi apresentado através dos valores médios horários para os primeiros três dias de tempestade, enquanto que para as HILDCAAs foram utilizados os valores médios horários para cinco dias de evento, uma vez que os eventos HILDCAA apresentam duração maior que as tempestades (TSURUTANI; GONZALEZ, 1987). A quantidade de dias escolhidos para as tempestades e HILDCAAs foi necessária para padronizar a apresentação dos dados e levou em conta que a maior parte dos eventos ocorriam inteiramente dentro desse intervalo de tempo, portanto, isso não significa necessariamente que todos os eventos catalogados tiveram exatamente o tempo de duração mostrado nas figuras. Mendillo (1971), por exemplo, realizou o primeiro estudo estatístico para o componente de tempo local de tempestades TEC em períodos de 4 dias, mesmo que houvessem tempestades com mais de 4 dias de duração.

Figura 4. 8. Média dos valores de TEC para cada tipo de evento medidos na estação de SALU.

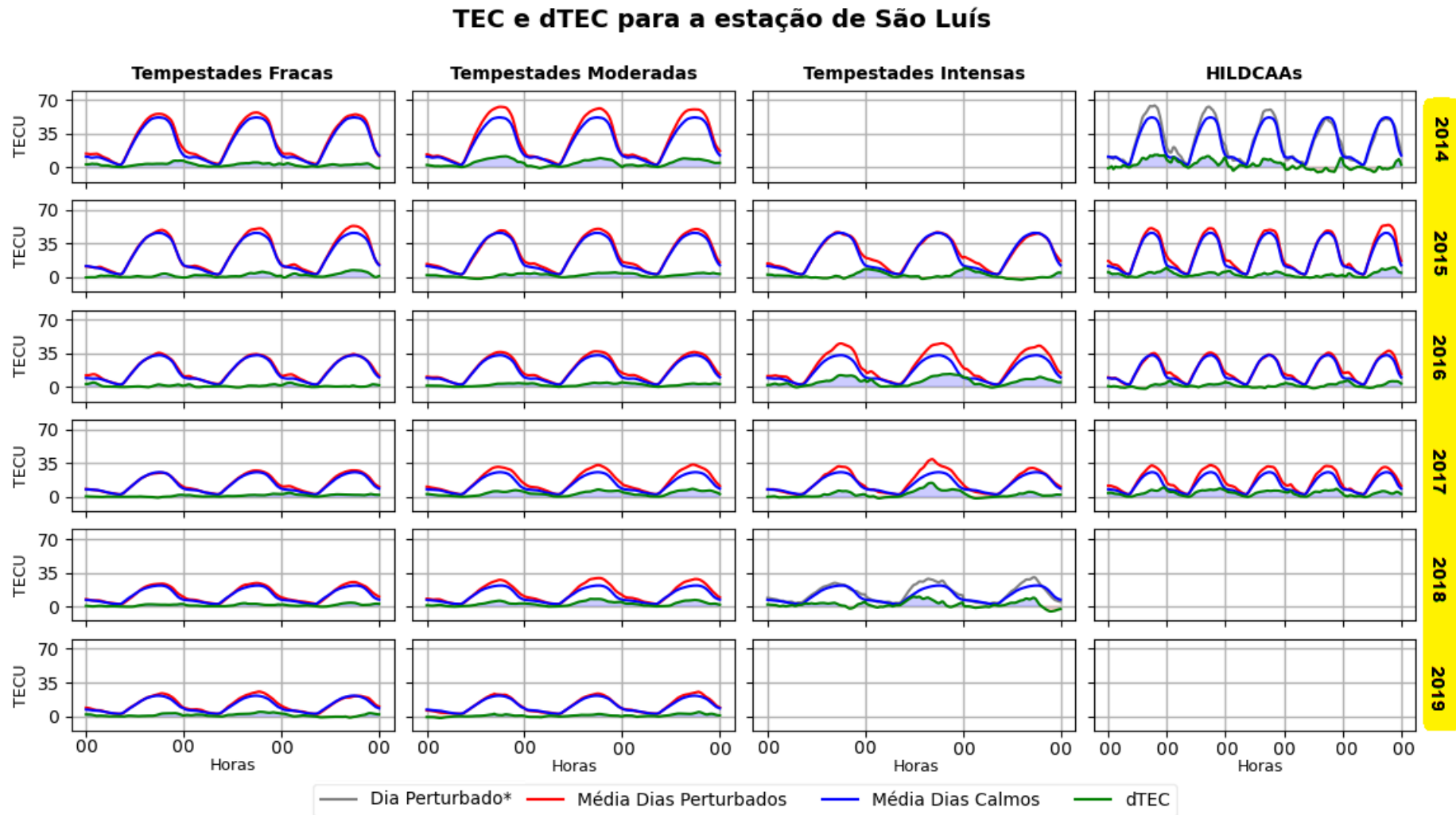
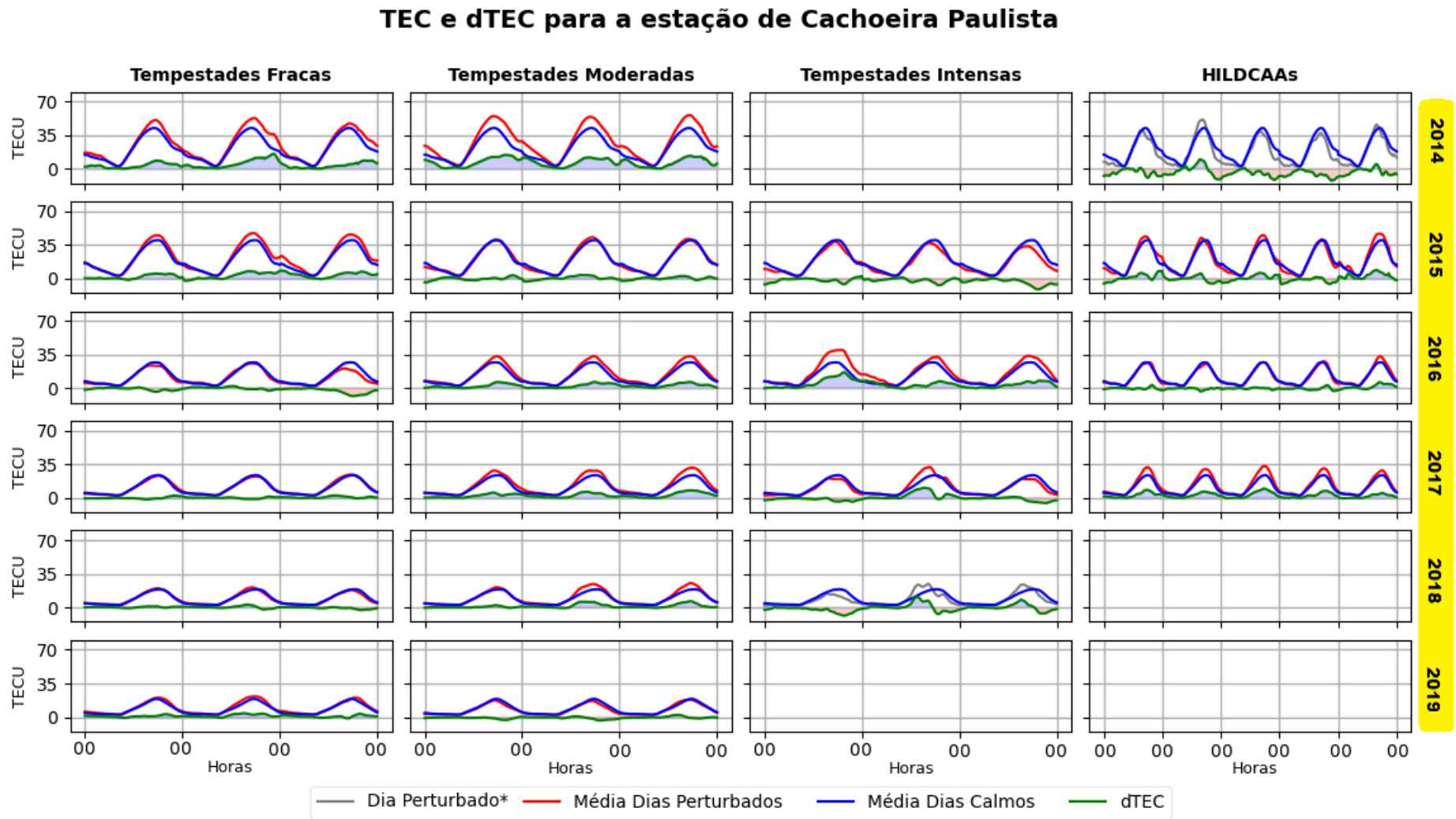


Figura 4. 9. Média dos valores de TEC para cada tipo de evento medidos na estação de CHPI.



As linhas na cor vermelha indicam a média do TEC de todos os dias perturbados; as linhas na cor azul representam a média do TEC de referência de dia calmo; as linhas na cor cinza mostram os dias em que não houve eventos suficientes para a realização de uma média aritmética e, por isso, representam apenas um evento; as linhas na cor verde identificam o dTEC ($dTEC = TEC \text{ perturbado} - TEC \text{ dia calmo de referência}$). Os painéis sem dados referem-se à ausência de eventos para aqueles determinados períodos.

Em relação às tempestades magnéticas, ao se comparar as figuras 4.8 e 4.9 percebe-se que as respostas da ionosfera as perturbações geomagnéticas, i. e., tempestades ionosféricas são, em média, de fase positiva. Matsushita realizou um estudo em 1959 analisando a densidade eletrônica da ionosfera durante mais de cem tempestades geomagnéticas. Entre os principais resultados, ele anunciou que a fase positiva da tempestade ionosférica tem maior duração quanto menor for a latitude, e que em baixas latitudes o TEC não apresenta valores negativos. De fato, é possível perceber que o nosso estudo latitudinal está coerente com o conhecido na literatura, uma vez que a estação equatorial apresenta valores positivos e de maior duração que a estação de baixa latitude. Contudo, algumas fases negativas são observadas em Cachoeira Paulista. Em um estudo focado na região brasileira durante períodos perturbados, Negreti (2012) encontrou tempestades ionosféricas negativas em baixas latitudes. A razão das fases negativas ocorrer é devido ao surgimento de um mecanismo chamado Dínamo Perturbado (BLANC; RICHMOND, 1980). Durante períodos perturbados, ocorre todo um mecanismo de aquecimento auroral, ventos perturbados, produção de correntes elétricas em médias latitudes as quais polarizam a ionosfera de baixa latitude. A principal contribuição do dínamo perturbado em baixas latitudes é estabelecer um campo elétrico de polaridade oposta ao campo elétrico de dia calmo da ionosfera. Como consequência, o conteúdo eletrônico total apresenta valores menores que o esperado.

Em relação aos eventos HILDCAA observa-se que o TEC apresentou respostas predominantemente positivas. De acordo com Silva et al. (2020) esse resultado decorre devido a contínua injeção de energia e da precipitação energética de partículas aumentando a densidade de elétrons da ionosfera. Contudo, podemos

perceber as sucessivas tempestades ionosféricas negativas para o evento HILDCAA de 2014 em CHPI. O mecanismo que causa valores do TEC inferiores ao esperado para o dia calmo é o mesmo já mencionado anteriormente, ou seja, dínamo perturbado. O dínamo perturbado é conhecido por ter efeitos prolongados.

Por fim, embora as figuras 4.8 e 4.9 tenham sido construídas para priorizar a comparação das respostas do TEC em diferentes latitudes, ainda assim a dependência do TEC com o ciclo solar é mais visível. A variação da atividade solar durante a fase descendente produz uma resposta do TEC de grande magnitude quando comparado com as variações de latitude. Esse resultado também corrobora com Lekshmi et al. (2011) ao compararem uma estação situada na EIA e outra em alta latitude.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisou-se o comportamento do TEC durante a fase descendente do ciclo solar 24, que durou de abril de 2014 até dezembro de 2019, nas estações de São Luís e Cachoeira Paulista para diferentes tipos e intensidades de perturbações geomagnéticas. De modo geral, foi observado como a proporção de SCs está relacionada com a quantidade total de tempestades magnéticas; de que modo o TEC perturbado variou ao longo da fase descendente do ciclo solar e as diferenças apresentadas entre o comportamento do TEC na estação equatorial e de baixa latitude durante a ocorrência de 164 tempestades magnéticas e 31 HILDCAAs.

No que diz respeito as ocorrências de SSCs/SIs, constatou-se que aproximadamente 26% das tempestades geomagnéticas catalogadas estão associadas com SCs além de que foram verificadas, no geral, uma maior quantidade anual de SSCs do que SIs. Complementando esses resultados, também se verificou que os SCs ocorrem com maior frequência no início do que no final da fase descendente do ciclo solar, o que era esperado uma vez que SCs estão associados com a atividade do ciclo solar (JOSELYN; TSURUTANI, 1990; ECHER et al., 2005)

Em relação a análise de dependência do TEC com o ciclo solar, os resultados

encontrados mostram que as tempestades fracas, moderadas e intensas e eventos HILDCAA apresentam maiores valores de TEC no início da fase descendente do ciclo solar do que no final. Isso foi observado através do registro de maiores valores máximos de TEC para as estações de SALU e CHPI durante os anos de 2014, 2015 e 2016 do que para os anos de 2017, 2018 e 2019. Além disso, foi observada uma tendência aproximadamente linear entre a fase descendente do ciclo solar e o aumento do TEC, de modo que quanto mais nos distanciamos do início da fase descendente mais os valores do TEC tendem a diminuir. Esses resultados estão coerentes com a literatura científica que confirma uma correlação aproximadamente linear da atividade solar com o comportamento do TEC (LIU; CHEN, 2009; LIU et al., 2011)

Já a dependência do TEC com a latitude para SALU e CHPI mostrou que, ao efetuar a média aritmética do TEC dos primeiros 3 dias para as tempestades e dos primeiros 5 dias para HILDCAAs, quase todas as fases de TEC observadas foram positivas. Apesar da pequena quantidade de fases negativas, a estação de baixa latitude apresentou mais ocorrências de fases negativas que a estação equatorial. Outra observação sobre as respostas latitudinais entre as estações foi a verificação de que mesmo destacando parâmetros que ressaltassem a dependência do TEC com a latitude, ainda assim a dependência com o ciclo solar se sobressai, mesmo durante uma parte da fase do ciclo solar.

Estudos Futuros

O principal objetivo deste trabalho foi compreender o comportamento do TEC em latitudes baixas e equatoriais durante fase descendente do ciclo solar através de tempestades magnéticas de diferentes intensidades e HILDCAAs. Para isso, foi desenvolvido um catálogo de tempestades magnéticas e HILDCAAs que cobre o período de abril de 2014 até dezembro de 2019. É possível, ainda, através do catálogo elaborado e dos resultados obtidos no atual estudo, como perspectiva de trabalhos futuros, uma análise comparativa entre o comportamento do TEC de latitudes baixas e equatoriais e os drives responsáveis pelas SSC/SI para elucidar os efeitos que os diferentes choques podem causar na ionosfera

nessas regiões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKASOFU, Syun-Ichi; CHAPMAN, Sydney. The ring current, geomagnetic disturbance, and the Van Allen radiation belts. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, n. 5, p. 1321-1350, 1961. DOI: 10.1029/JZ066i005p01321

ANDERSON D. N.; ROBLE R. G. Neutral wind effects on the equatorial F-region ionosphere. **Journal Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, p. 835–843. 1981. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90061-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90061-1)

AZPILICUETA, F.; NAVA, B. A different view of the ionospheric winter anomaly. **Advances in Space Research**, [S. l.], p. 1-13, 25 out. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.039>. Acesso em: 15 jul. 2022.

BALAN, N.; BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J.; BAILEY, G. J. Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere. **Journal Of Geophysical Research**, [S. l.], v. 103, n. A12, p. 29169-29181, 1 dez. 1998.

BAUMJOHANN, W.; TREUMANN, R. A. **Basic space plasma physics**. London, UK: Imperial College Press, 1997. 341p. ISBN 18-60-94017-X.

BLANC, M.; RICHMOND, A.D. The ionospheric disturbance dynamo. **Journal Of Geophysical Research**, [S. l.], v. 85, n. A4, p. 1669-1686, 1 abr. 1980. DOI <https://doi.org/10.1029/JA085iA04p01669>. Acesso em: 9 jul. 2022.

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

DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus, 1990. 580 p.

ECHER, E.; GONZALEZ, W. D.; VIEIRA, L. E. A; DAL LAGO, A.; GUARNIERI, F. L; PRESTES, A.; GONZALEZ, A. L. C; SCHUCH, N. J. Interplanetary shock parameters during solar activity maximum (2000) and minimum (1995-1996). **Brazilian Journal of Physics** , [S. l.], v. 33, n. 1, p. 115-122, 11 mar. 2003. DOI <https://doi.org/10.1590/S0103-97332003000100010>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjp/a/HJ8dXdpFrTq3WQvbzXd5BBt/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 14 jul. 2022.

ECHER, E.; GONZALEZ, W. D.; DAL LAGO, A.; VIEIRA, L. E. A; GUARNIERI, F. L; GONZALEZ, A. L. C; SCHUCH, N. J. Interplanetary shocks and sudden

impulses during solar maximum (2000) and solar minimum (1995–1996). **Advances in Space Research**, [S. l.], v. 36, n. 12, p. 2313-2317, 9 abr. 2005. DOI <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.030>.

FEDRIZZI, M. **ESTUDO DO EFEITO DE TEMPESTADES MAGNETICAS NA IONOSFERA UTILIZANDO DADOS DO GPS**. Orientador: Ivan Jelinek Kantor. 2003. 242 p. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

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.

HARGREAVES, J. K. **The Solar-Terrestrial Environment: An introduction to geospace - the science of the terrestrial upper atmosphere , ionosphere and magnetosphere**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 1979. 414 p.

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.

IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC – O que é**. 2022. 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: 29 abr. 2022a.

IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC - Dados diários e situação operacional**. 2022. 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=dados-diarios-e-situacao-operacional>>. Acesso em: 29 abr. 2022b.

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.

JOSELYN, J. A.; TSURUTANI, B. T. Geomagnetic Sudden Impulses and Storm Sudden Commencements: A Note on Terminology. **Advancing Earth and Space Science**, [S. l.], v. 71, n. 47, p. 1808-1809, 20 nov. 1990. DOI:

10.1029/90EO00350.

JUNIOR, E. S. F. **O Sistema GPS Como Ferramenta Para a Avaliação da Refração Ionosférica no Brasil**. 2002. 176 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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 HILD-CAA/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.

LEKSHMI, D. V.; BALAN, N.; RAM, S. T.; LIU, J. Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. **JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH**, [S. l.], v. 116, n. A11, p. 1-13, 29 nov. 2011. DOI 10.1029/2011JA017042. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JA017042>. Acesso em: 26 maio 2022.

LIU, L; CHEN, Y. Statistical analysis of solar activity variations of total electron content derived at Jet Propulsion Laboratory from GPS observations. **Journal of Geophysical Research**, [S. l.], v. 114, p. 1-10, 21 out. 2009. DOI 10.1029/2009JA014533.R

LIU, L; WEIXING, W; YIDING, C; HUIJUN, L. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review. **Chinese Sci Bull**, [S. l.], v. 56, n. 12, p. 1202-1211, 1 abr. 2011. DOI 10.1007/s11434-010-4226-9.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira**. 2007. 264 p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.

MATSUSHITA, S. A study of the morphology of ionospheric storms. **Journal of geophysical research**, [S. l.], v. 234, n. 45, p. 305-321, 1 mar. 1959. DOI <https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305>. Acesso em: 9 jul. 2022.

MENDILLO, M. Ionospheric Total Electron Content Behaviour during Geomagnetic Storms. **Nature**, [S. l.], v. 234, n. 45, p. 23-24, 8 nov. 1971. DOI <https://doi.org/10.1038/physci234023a0>. Acesso em: 17 jun. 2022.

MENDILLO, M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. **Reviews of Geophysics**, [S. l.], v. 44, n. 4, p. 1-47, 8 nov. 2006. DOI <https://doi.org/10.1029/2005RG000193>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005RG000193>. Acesso em: 1 abr. 2022.

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

NOGUEIRA, P. A. B. **Estudo da Anomalia de ionização equatorial e dos ventos termosféricos meridionais durante períodos calmos e perturbados na região de baixas latitudes brasileira**. Orientador: Mangalathayil Ali Abdu. 2009. 146 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [S. l.], 2009.

OBRIDKO, V. N.; KANONIDI, Kh. D.; MITROFANOVA, T. A.; SHELTING, B. D. Solar Activity and Geomagnetic Disturbances. **Geomagnetism and Aeronomy**, [S. l.], v. 53, n. 2, p. 147-156, 26 mar. 2013. DOI 10.1134/S0016793213010143. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0016793213010143>. Acesso em: 14 jul. 2022.

PICANÇO, G. A. S. **DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM ÍNDICE IONOSFÉRICO BASEADO EM DADOS DE CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL**. 2019. 158 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019. Disponível em: http://www.inpe.br/posgraduacao/ges/arquivos/dissertacoes/dissertacao_giorgio_arlan_silva_picanco_2019.pdf. Acesso em: 10 fev. 2022.

POZ, W. R. D; CAMARGO, P. O. **INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO ESPACIAL DO TEC NA DEFINIÇÃO DO COMPRIMENTO DE LINHA DE BASE: ABORDAGEM TEÓRICA E PRÁTICA**. Revista Brasileira de Cartografia, New Brunswick, Canadá, n. 60/4, p. 363-374, 1 dez. 2008. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44862>

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York, London: Academic Press, 1969. 331 p. ed. 14. ISBN (0125889402).

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

SEUN, O. T. **INVESTIGATION OF REGIONAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES OVER AFRICA (IRIA)**. 2021. 170 p. Tese (Doutorado) - Von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt der Technischen Universität Berlin, Berlin, 2021.

SILVA, R. P.; SOBRAL, J. H. A.; KOGA, D.; SOUZA, J. R. Evidence of prompt penetration electric fields during HILDCAA events, **Ann. Geophys.**, v. 35, p.

1165–1176, <https://doi.org/10.5194/angeo35-1165-2017>, 2017.

SILVA, R. P.; DENARDINI, C. M.; MARQUES, M. S.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J.; PICANÇO, 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.

SØRAAS, F., AARSNES, K., OKSAVIK, K., SANDANGER, M. I., EVANS, D. S., & GREER, M. S. (2004). Evidence for particle injection as the cause of Dst reduction during HILDCAA events. **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, 66(2), 177-186. DOI: 10.1016/j.jastp.2003.05.001

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The cause of high intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA): interplanetary Alfvén wave trains. **Planet Space Science**, v. 35, p. 405-412, 1987.

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. The Interplanetary causes of magnetic storms: A review, **Geophysical Monograph Series**, (p. 77– 89). 1997. doi:10.1029/GM098p0077.

WANLISS, J. A.; SHOWALTER, K. M. High-resolution global storm index: Dst versus SYM-H. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 111, n. A2, p. 1-10, 17 fev. 2006. DOI: 10.1029/2005JA011034.

WEBSTER, I.R. **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. 1993. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canadá, 1993.

WRENN, G. L.; RODGER, A. S.; RISHBETH, H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. I: diurnal and seasonal patterns for main phase effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 49, p. 901-913, 1987.

YOON, W.; PARK, K. On the Diurnal, Annual, and Solar Cycle Variations of Slant Total Electron Content in the Korean Peninsula. **Journal of Positioning, Navigation, and Timing**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 87-96, 15 jun. 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.11003/JPNT.2016.5.2.087>. Disponível em: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201619535605098.page>. Acesso em: 15 mar. 2022.

APÊNDICE A - DIAS CALMOS PARA REFERÊNCIA UTILIZADOS NESTE TRABALHO

Nessa seção são apresentados os três dias mais calmos de cada mês utilizando o índice Kp. Como mencionado na seção 3.1.1, os três dias mais calmos do mês foram utilizados para fazer uma média de referência. Os resultados são mostrados em 4 colunas que são separadas por barras duplas (//) de modo que, para cada ano destacado em amarelo, a primeira coluna indica o mês, enquanto que a segunda, terceira e quarta coluna mostram o primeiro, segundo e terceiro dia mais calmo de cada mês. Na segunda, terceira e quarta coluna, os dias mais calmos de cada mês são apresentados no formato AAAAMMDD em que os quatro primeiros dígitos referem-se ao ano, os dois dígitos seguintes indicam o mês e os dois últimos referem-se ao dia.

Não há resultado para os quatro primeiros meses de 2014 uma vez que o estudo foi realizado durante a fase descendente do ciclo solar 24 que durou de maio de 2014 até dezembro de 2019. Os valores do índice Kp em ordem crescente são 0; 0+; 1-;1;1+;2-;2;2+;3-;3;3+;4-;4...

2014

01-jan //

02-fev //

03-mar //

04-abr //

05-mai // 20140521-kp = 2 // 20140506-kp = 3 // 20140502-kp = 3+

06-jun // 20140601-kp = 4+ // 20140612-kp = 5 // 20140623-kp = 5

07-jul // 20140719-kp = 2 // 20140718-kp = 3+ // 20140720-kp = 4

08-ago // 20140816-kp = 2 // 20140824-kp = 4- // 20140825-kp = 4-

09-set // 20140914-kp = 3 // 20140915-kp = 4- // 20140917-kp = 9+

10-out // 20141012-kp = 5+ // 20141003-kp = 6+ // 20141030-kp = 8

11-nov // 20141128-kp = 7- // 20141126-kp = 7 // 20141129-kp = 8

12-dez // 20141211-kp = 8 // 20141218-kp = 11- // 20141217-kp = 11+

2015

01-jan // 20150120-kp = 4 // 20150118-kp = 7 // 20150119-kp = 8-
02-fev // 20150213-kp = 3+ // 20150214-kp = 4 // 20150227-kp = 4
03-mar // 20150310-kp = 8 // 20150330-kp = 8 // 20150309-kp = 9
04-abr // 20150425-kp = 1- // 20150426-kp = 3- // 20150408-kp = 6-
05-mai // 20150525-kp = 3+ // 20150521-kp = 4- // 20150522-kp = 4
06-jun // 20150620-kp = 1+ // 20150605-kp = 2 // 20150604-kp = 3-
07-jul // 20150719-kp = 2+ // 20150702-kp = 3 // 20150703-kp = 3+
08-ago // 20150814-kp = 4 // 20150830-kp = 7+ // 20150831-kp = 8+
09-set // 20150930-kp = 3- // 20150927-kp = 6 // 20150928-kp = 7-
10-out // 20151028-kp = 1+ // 20151026-kp = 2 // 20151027-kp = 6
11-nov // 20151124-kp = 0 // 20151125-kp = 0 // 20151123-kp = 2
12-dez // 20151230-kp = 5- // 20151203-kp = 7- // 20151204-kp = 8

2016

01-jan // 20160125-kp = 2+ // 20160130-kp = 3- // 20160129-kp = 5-
02-fev // 20160222-kp = 4+ // 20160227-kp = 6- // 20160228-kp = 6-
03-mar // 20160326-kp = 3+ // 20160313-kp = 5+ // 20160305-kp = 6-
04-abr // 20160409-kp = 3- // 20160419-kp = 3- // 20160401-kp = 4-
05-mai // 20160525-kp = 4 // 20160526-kp = 4+ // 20160512-kp = 6
06-jun // 20160603-kp = 3+ // 20160602-kp = 4+ // 20160621-kp = 5
07-jul // 20160727-kp = 4+ // 20160705-kp = 5+ // 20160718-kp = 5+
08-ago // 20160828-kp = 4- // 20160801-kp = 5- // 20160815-kp = 5+
09-set // 20160916-kp = 4 // 20160917-kp = 5 // 20160923-kp = 5+
10-out // 20161021-kp = 1+ // 20161011-kp = 3 // 20161020-kp = 4-
11-nov // 20161119-kp = 2 // 20161105-kp = 3 // 20161108-kp = 3+
12-dez // 20161204-kp = 1+ // 20161216-kp = 2+ // 20161203-kp = 3-

2017

01-jan // 20170116-kp = 2+ // 20170124-kp = 5- // 20170117-kp = 5
02-fev // 20170214-kp = 2- // 20170226-kp = 3- // 20170215-kp = 5-
03-mar // 20170320-kp = 2 // 20170319-kp = 3- // 20170318-kp = 3
04-abr // 20170416-kp = 6+ // 20170417-kp = 6+ // 20170413-kp = 7+
05-mai // 20170526-kp = 4- // 20170525-kp = 4 // 20170503-kp = 5+
06-jun // 20170604-kp = 3 // 20170620-kp = 3+ // 20170608-kp = 6-
07-jul // 20170705-kp = 2+ // 20170714-kp = 3+ // 20170708-kp = 4
08-ago // 20170815-kp = 4 // 20170828-kp = 4+ // 20170826-kp = 6-
09-set // 20170909-kp = 6- // 20170926-kp = 6 // 20170925-kp = 8-
10-out // 20171009-kp = 3- // 20171030-kp = 3 // 20171010-kp = 3+
11-nov // 20171106-kp = 1 // 20171105-kp = 2- // 20171126-kp = 4
12-dez // 20171203-kp = 1+ // 20171222-kp = 2 // 20171221-kp = 4-

2018

01-jan // 20180117-kp = 1+ // 20180118-kp = 2- // 20180106-kp = 3
02-fev // 20180211-kp = 3- // 20180213-kp = 3+ // 20180214-kp = 3+
03-mar // 20180328-kp = 3- // 20180312-kp = 3+ // 20180313-kp = 5-
04-abr // 20180419-kp = 3- // 20180416-kp = 4- // 20180417-kp = 5-
05-mai // 20180521-kp = 3 // 20180520-kp = 4 // 20180525-kp = 5-
06-jun // 20180616-kp = 3- // 20180610-kp = 4- // 20180615-kp = 5-
07-jul // 20180701-kp = 3- // 20180709-kp = 3- // 20180702-kp = 3
08-ago // 20180806-kp = 5- // 20180814-kp = 6 // 20180830-kp = 6+
09-set // 20180920-kp = 2- // 20180919-kp = 6 // 20180908-kp = 7
10-out // 20181018-kp = 1- // 20181020-kp = 1 // 20181019-kp = 2+

11-nov // 20181116-kp = 1+ // 20181117-kp = 1+ // 20181115-kp = 2

12-dez // 20181215-kp = 2- // 20181213-kp = 2+ // 20181214-kp = 2+

2019

01-jan // 20190102-kp = 1- // 20190128-kp = 2- // 20190103-kp = 2

02-fev // 20190225-kp = 2 // 20190224-kp = 2+ // 20190223-kp = 3-

03-mar // 20190322-kp = 1+ // 20190323-kp = 1+ // 20190321-kp = 2+

04-abr // 20190418-kp = 3 // 20190422-kp = 5 // 20190417-kp = 5+

05-mai // 20190508-kp = 3- // 20190519-kp = 4+ // 20190505-kp = 5+

06-jun // 20190606-kp = 3 // 20190611-kp = 3+ // 20190617-kp = 3+

07-jul // 20190726-kp = 2 // 20190720-kp = 3 // 20190725-kp = 3+

08-ago // 20190803-kp = 3- // 20190819-kp = 5+ // 20190829-kp = 5+

09-set // 20190920-kp = 4+ // 20190923-kp = 4+ // 20190926-kp = 5

10-out // 20191013-kp = 1- // 20191023-kp = 2 // 20191022-kp = 5-

11-nov // 20191118-kp = 0+ // 20191102-kp = 1+ // 20191103-kp = 2

12-dez // 20191229-kp = 1 // 20191203-kp = 2- // 20191228-kp = 2-