



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.12.22.27-TDI

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM ÍNDICE IONOSFÉRICO BASEADO EM DADOS DE CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL

Giorgio Arlan da Silva Picanço

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Paulo Alexandre Bronzato Nogueira, aprovada em 28 de março de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3ST7PHB>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

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

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.12.22.27-TDI

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM ÍNDICE IONOSFÉRICO BASEADO EM DADOS DE CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL

Giorgio Arlan da Silva Picanço

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Paulo Alexandre Bronzato Nogueira, aprovada em 28 de março de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3ST7PHB>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Picanço, Giorgio Arlan da Silva.

P58d Desenvolvimento e análise de um índice ionosférico baseado em dados de Conteúdo Eletrônico Total / Giorgio Arlan da Silva Picanço. – São José dos Campos : INPE, 2019.
xxx + 158 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.12.22.27-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Paulo Alexandre Bronzato Nogueira.

1. Ionosfera terrestre. 2. DIX. 3. Perturbações ionosféricas.
4. Tempestades geomagnéticas. 5. Bolhas de plasma. I.Título.

CDU 523.4-853



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

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

Aluno (a): *Giorgio Arlan da Silva Picanço*

Título: "DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM ÍNDICE IONOSFÉRICO BASEADO EM DADOS DE CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre

Dr. Cristiano Max Wrasse

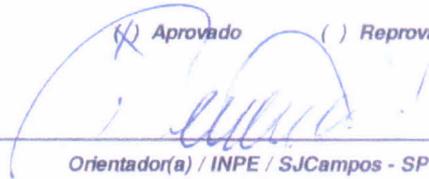


Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Clezio Marcos De Nardin

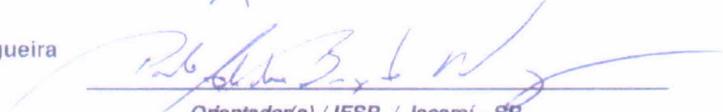


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Paulo Alexandre Bronzato Nogueira



Orientador(a) / IFSP. / Jacareí - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Hisao Takahashi



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Odim Mendes Junior



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
**Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente
Solar-Terrestre**

Dr. Paulo Roberto Fagundes



Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

*“A muitas cidades do Egito peregrina / para aprender, para aprender dos
Doutos. / Tem todo o tempo Ítaca na mente. / Está predestinado a ali chegar.”*

Konstantínos Kaváfis em “Ítaca” (1911)

Aos meus amados pais, Kildare e Nilza.

Sempre foi por vocês.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por trazer-me paz de espírito e guiar meus passos ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Nilza e Kildare, por motivarem-me e acreditarem sempre nos meus planos. Durante esta jornada de onze anos longe de casa, vocês sempre foram meu maior incentivo. Com vocês em mente, eu jamais ousei duvidar da minha capacidade.

À minha amada, Tanara Dalla Costa, com quem eu passei e ainda irei passar muitos momentos de felicidade. Agradeço todo o seu apoio, incentivo, carinho, amizade e o seu sorriso. Você é a minha maior inspiração. Todos os sacrifícios e dificuldades que enfrentamos juntos são válidos e jamais serão em vão.

Aos meus grandes amigos, Sony e Laysa, cujas personalidades completamente opostas me mantiveram em constante equilíbrio durante o desenvolvimento das atividades do mestrado. Que nossa amizade seja eterna. Obrigado por tudo!

Ao meu orientador, Dr. Clezio Marcos De Nardin, pelo constante otimismo, por conduzir nossa pesquisa de forma excepcional, por acreditar na minha capacidade e por sempre me dizer a verdade. Que este seja o início de uma parceria duradoura.

Ao meu orientador, Dr. Paulo Alexandre Nogueira, por dedicar seu tempo ao desenvolvimento do trabalho e pelos constantes *insights* que enriqueceram o trabalho de forma virtuosa.

Ao meu colega Paulo França por compartilhar comigo seus avanços, pelas críticas e também as sugestões feitas no decorrer da pesquisa.

Ao Dr. Cosme Figueiredo por estar sempre disposto a ajudar-me. As conversas e sugestões de leitura foram muito importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha colega Carolina Carmo pela ajuda com o cálculo dos dados de TEC utilizados neste trabalho.

Ao Dr. Diego Barros pela ajuda com os mapas de TEC utilizados neste trabalho.

Às Dras. Inez Batista e Ângela Valentim por gentilmente disponibilizarem os dados de ionossonda utilizados neste trabalho.

Aos Drs. Marcelo Banik e Rodolfo Lotte pela paciência ao me ajudarem com minhas dúvidas a respeito dos dados de TEC do Programa Embrace.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem avaliar esta dissertação.

Ao Programa Embrace/INPE pelo provimento dos arquivos TECMAP e ao IBGE pelo fornecimento dos dados de GPS utilizados neste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de desenvolver este trabalho da melhor forma possível. Agradeço também a todos os professores da pós-graduação em Geofísica Espacial pelos excelentes cursos ministrados durante o primeiro ano do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelos auxílios concedidos durante a minha participação em eventos científicos.

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se um estudo sobre o desenvolvimento e a análise de um índice ionosférico baseado em dados de Conteúdo Eletrônico Total (TEC), denominado ‘índice local de perturbações ionosféricas’ (LDIX). Para auxiliar esta pesquisa, estudaram-se as perturbações ionosféricas observadas durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados. Para isso, foram analisados dez períodos específicos do ano de 2015, sendo cinco para cada condição geomagnética. O índice LDIX foi calculado ao longo de todos esses períodos e os resultados obtidos foram comparados com diversos parâmetros ionosféricos e magnéticos conhecidos e consolidados na literatura, tais como o foF2, o h'F e o ΔH . Na análise comparativa, também foram utilizados os índices geomagnéticos Kp, AE e Dst, assim como outros parâmetros dos ionogramas, mapas de TEC e o índice ionosférico DIX. As variações dos períodos geomagneticamente perturbados foram analisadas de acordo com os processos físicos que ocorrem durante tempestades geomagnéticas (e.g. penetração de campos elétricos, dínamo perturbado). Adicionalmente, as variações observadas durante os períodos geomagneticamente calmos foram analisadas de acordo com os processos ionosféricos de origem interna (e.g. bolhas de plasma, dinâmica da atmosfera). No intuito de qualificar o resultado do novo índice quanto à forma de cálculo do TEC que leva ao LDIX, foi verificada a diferença entre os valores de LDIX calculados a partir do TEC obtido dos TECMAPs do Programa Embrace/INPE e o TEC obtido diretamente de dados de GNSS, sendo esta diferença média estimada em ~7,8%. Essa análise revelou que não há divergências significativas entre as formas de cálculo do LDIX. Quanto aos demais resultados, verificou-se que os índices LDIX e DIX apresentaram pequenas discrepâncias pontuais na ausência de variações ionosféricas de grande amplitude. Outro ponto relevante observado foram as limitações que o índice DIX apresentou quanto à detecção de perturbações ionosféricas de caráter diurno. Em contrapartida, o índice LDIX foi capaz de detectar tais perturbações, variando seu valor de forma gradativa. Verificou-se, ainda que o índice DIX apresentou discordâncias com relação ao LDIX, indicando perturbações inexistentes no TEC. Essas variações foram classificadas como falsos positivos nas análises deste trabalho. Adicionalmente, verificou-se uma forte relação entre os processos físicos observados no parâmetro foF2 e as perturbações observadas no LDIX, o que constata a significância física do LDIX. Nesse contexto, o LDIX mostrou-se superior ao índice DIX, visto que este não apresentou a mesma similaridade física com relação ao parâmetro foF2. Finalmente, verificou-se que o índice LDIX é capaz de detectar as respostas ionosféricas da ocorrência de campos elétricos do tipo *overshielding*, campos elétricos do dínamo perturbado (DDEF) e de bolhas de plasma de forma localizada.

Palavras-chave: Ionosfera terrestre. LDIX. DIX. Perturbações Ionosféricas. Tempestades Geomagnéticas. Bolhas de plasma.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AN IONOSPHERIC INDEX BASED ON TEC DATA

ABSTRACT

The present manuscript presents a study of the development and the analysis of an ionospheric index based on Total Electron Content (TEC) data, named Local Disturbance Ionosphere index (LDIX). In order to support such development, ionospheric disturbances observed during geomagnetically quiet and disturbed periods were studied. Thus, ten periods on 2015 were selected and analyzed, five of them to each geomagnetic condition. Therefore, the LDIX was calculated during these periods and the results were compared with several ionospheric and magnetic known established parameters, such as foF2, h'F and ΔH . In the comparative analysis, geomagnetic indices Kp, AE and Dst were also used, as well as others ionogram parameters, TEC maps and the DIX. The index variations during geomagnetically disturbed periods were analyzed according to the driving physical processes ruling during geomagnetic storms (e.g., electric field penetration, ionospheric disturbance dynamo). On the other hand, LDIX variations observed during the geomagnetically quiet periods were analyzed in terms of the ionospheric processes of internal origin (e.g., plasma bubbles, atmospheric dynamics). In order to qualify the results of the new ionospheric index as to the calculation of the TEC that leads to the LDIX, we also verified a difference of 7.8% between the values of LDIX calculated from the TEC as they are obtained from the TECMAPs of the Embrace/INPE Program and the TEC obtained directly from GNSS data. With regard to the other results, it was observed that LDIX and DIX indices showed small discrepancies in the absence of ionospheric variations of high-amplitude. Another relevant point observed were the limitations that the DIX index presented concerning the detection of daytime ionospheric disturbances. In contrast, the LDIX index was able to detect such disturbances, varying its value in a gradual way. It was also verified that the DIX presented disagreements to the LDIX, indicating non-existent TEC disturbances. These variations were classified as false positives results in the analysis. In addition, a strong relationship was observed between the physical processes observed in the foF2 parameter and the disturbances observed in the LDIX, which confirms the LDIX physical significance. Thus, the LDIX index showed to be superior to DIX, since it did not present the same physical similarity observed in LDIX with respect to the foF2 parameter. Finally, it was verified that the LDIX index is able to detect ionospheric responses due overshielding electric fields, Disturbance Dynamo Electric Fields (DDEF) and plasma bubbles in a localized way.

Keywords: Earth's ionosphere. LDIX. DIX. Ionospheric Disturbances. Geomagnetic Storms. Plasma bubbles.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Perfil vertical da taxa de produção de íons na ionosfera, relacionando altura, intensidade de radiação solar e densidade de constituintes atmosféricos neutros.	8
Figura 2.2 - Perfil vertical de densidade da ionosfera, contendo a nomenclatura e a localização das regiões ionizadas.	9
Figura 2.3 - Ilustração da geometria da penetração ótica do raio solar na atmosfera.	11
Figura 2.4 - Perfis verticais de densidade eletrônica da ionosfera para diversos valores do ângulo solar zenital (SZA).	12
Figura 2.5 - Variação temporal observada no TEC durante o período de 12 a 17 de fevereiro de 2015, obtido a partir de uma estação GNSS localizada em São José dos Campos. Os retângulos na cor rosa representam os períodos noturnos, e os retângulos na cor laranja representam os períodos diurnos.	14
Figura 2.6 - Mapas da variação temporal do TEC durante os anos de (a) 1998 e (b) 2000, obtidos a partir de uma estação GPS localizada em Arequipa (16,5°S, 71,5°O),	16
Figura 2.7 - Mapas de TEC da ionosfera sobre a América do Sul, exibindo a ocorrência de bolhas de plasma. As linhas vermelhas indicam as direções de extensão das bolhas, e a linha pontilhada representa o terminadouro solar em uma altura de 300 km.	19
Figura 2.8 - Variação temporal típica do índice Dst durante a ocorrência de uma tempestade geomagnética. As linhas azuis indicam as diferentes fases da tempestade.	22
Figura 2.9 - Ilustração dos processos de penetração e blindagem de campos elétricos na ionosfera terrestre.	26
Figura 2.10 - Variação temporal do (a) índice Dst e dos (b) mapas de TEC para a região ionosférica de baixas latitudes, durante a tempestade geomagnética do período de 08 a 12 de janeiro de 1997.	27

Figura 2.11 - Ilustração dos processos que compreendem o sistema de correntes do dínamo perturbado.	29
Figura 3.1 - Ilustração da distribuição dos satélites e planos orbitais do sistema GPS, juntamente com os <i>slots</i> identificados pelo código alfanumérico.....	33
Figura 3.2 - Mapa indicando a evolução temporal das posições dos satélites GPS em órbita. Cada cor representa um dos dois planos orbitais (preto: A, vermelho: B, verde: C, azul: D, laranja: E, violeta: F).....	34
Figura 3.3 - Ilustração do processo de modulação dos códigos sobre as ondas portadoras do sistema GPS.	35
Figura 3.4 - Localização geográfica das estações do segmento de controle do sistema GPS.	37
Figura 3.5 - Diagrama de blocos ilustrando os principais componentes de um receptor GPS.....	38
Figura 3.6 - <i>Slots</i> e planos orbitais do sistema GLONASS.	39
Figura 3.7 - Posições dos satélites GLONASS projetadas no plano cartográfico.....	39
Figura 3.8 - Ilustração da estrutura do sinal aberto do sistema GLONASS.	41
Figura 3.9 - Localização geográfica dos componentes do segmento de controle do sistema GLONASS.....	42
Figura 3.10 - Ilustração do processo de nivelamento do STEC obtido a partir das medidas de pseudodistâncias ($P2 - P1$) e de fases ($L2 - L1$).	51
Figura 3.11 - Ilustração da geometria da trajetória de propagação do sinal GNSS transionosférico.	53
Figura 4.1 - Localização geográfica dos receptores GNSS utilizados pela rede Embrace.....	58
Figura 4.2 - Exemplo de mapa de observações da matriz georreferenciada de dados de TEC, obtido para 01:20h UT do dia 19/02/2014.	61
Figura 4.3 - Exemplo de TECMAP da ionosfera sobre a América do Sul, obtido para 11:00h UT do dia 14/03/2015.....	62
Figura 4.4 - Variação temporal do (A) TEC da Estação Virtual de São José dos Campos, e do (B) padrão diário de ionização no período de 17 a 21 de julho de 2015. O retângulo amarelo indica o dia mais calmo do período.....	65

Figura 4.5 - Variação temporal do (a) TEC da Estação Virtual de São José dos Campos, e do (b) padrão diário de ionização no período de 20 a 27 de novembro de 2015. As setas indicam depleções maiores do que 20 TECU durante o dia geomagneticamente mais calmo do período.....	66
Figura 4.6 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos entre 21:40h LT e 22:10h LT do dia 24 de novembro de 2015. As setas indicam a evolução temporal da ocorrência do Spread-F.....	67
Figura 4.7 - Gráficos de dispersão e ajuste linear entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos do mês de fevereiro e o TEC de referência derivado das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, juntamente com a (d) média mensal do TEC e o (e) TEC do modelo IRI.....	70
Figura 4.8 - Gráficos de dispersão e ajuste linear entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos do mês de junho e o TEC de referência derivado das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, juntamente com a (d) média mensal do TEC e o (e) TEC do modelo IRI.....	72
Figura 4.9 - Gráficos de dispersão e ajuste linear entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos do mês de novembro e o TEC de referência derivado das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, juntamente com a (d) média mensal do TEC e o (e) TEC do modelo IRI.	73
Figura 4.10 - Gráficos de variação temporal do coeficiente k para a Estação Virtual de São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente (gráfico 'a') calmos e (gráfico 'b') perturbados do ano de 2015.	79
Figura 5.1 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 12 a 17 de fevereiro de 2015.	82
Figura 5.2 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 24 de abril a 01 de maio de 2015.....	84

Figura 5.3 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 02 a 07 de junho de 2015.....	86
Figura 5.4 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 24 de setembro a 01 de outubro de 2015.	88
Figura 5.5 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 20 a 27 de novembro de 2015.	89
Figura 5.6 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética de 07 de janeiro de 2015.....	92
Figura 5.7- Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética do dia de St. Patrick.....	94
Figura 5.8 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética de 21 de junho de 2015.....	96
Figura 5.9 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética de 07 de outubro de 2015.	98
Figura 5.10 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética de 20 de dezembro de 2015.	99
Figura 5.11 - Gráficos de variação temporal do (a) LDIX calculado a partir do TEC dos TECMAPs (SJK) e (b) do LDIX calculado a partir do TEC da estação	

SJSP, juntamente com (c) os valores de TEC obtidos durante o período de 07 a 17 de janeiro de 2015.....	101
Figura 5.12 - Gráficos de variação temporal do (a) LDIX calculado a partir do TEC dos TECMAPs (SJK) e (b) do LDIX calculado a partir do TEC da estação SJSP, juntamente com (c) os valores de TEC obtidos durante o período de 14 a 27 de março de 2015.	103
Figura 5.13 - Gráficos de variação temporal do (a) LDIX calculado a partir do TEC dos TECMAPs e (b) do LDIX calculado a partir do TEC da estação SJSP, juntamente com (c) os valores de TEC obtidos durante o período de 20 a 29 de junho de 2015.....	104
Figura 5.14 - Gráficos de variação temporal do (a) LDIX calculado a partir do TEC dos TECMAPs e (b) do LDIX calculado a partir do TEC da estação SJSP, juntamente com (c) os valores de TEC obtidos durante o período de 05 a 13 de outubro de 2015.	106
Figura 5.15 - Gráficos da taxa de variação do parâmetro (a) foF2 e dos índices (b) LDIX, (c) DIX e (d) Dst, durante o período de 14 a 27 de março de 2015.	109
Figura 5.16 - Gráficos da taxa de variação do parâmetro (a) foF2 e dos índices (b) LDIX, (c) DIX e (d) Dst, durante o período de 20 a 29 de junho de 2015.	110
Figura 6.1 - Variações de velocidade e pressão do vento solar durante os dias 17 e 18 de março de 2015.	115
Figura 6.2 - Variação temporal (gráficos de 'a' a 'd') dos parâmetros de ionossonda, (e) do LDIX, (f) do TEC, (g) do parâmetro ΔH , e dos índices geomagnéticos (h) Dst e (i) AE, obtidos durante a tempestade geomagnética de St. Patrick.....	117
Figura 6.3 - Variações de velocidade e pressão do vento solar durante os dias 22 e 23 de junho de 2015.....	122
Figura 6.4 - Variação temporal (gráficos de 'a' a 'd') dos parâmetros de ionossonda, (e) do LDIX, (f) do TEC, (g) do parâmetro ΔH , e dos índices geomagnéticos (h) Dst e (i) AE, obtidos durante a tempestade geomagnética 22 de junho de 2015.....	123
Figura 7.1 - Variação temporal dos índices (a) LDIX, juntamente com (c) o TEC e seus valores calmos de referência, acompanhado (d) dos valores do índice	

Kp durante o período de 20 a 24 de novembro de 2015. As linhas azuis verticais representam os Eventos numerados de 1 a 5.....	128
Figura 7.2 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 1.....	130
Figura 7.3 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 22:00h UT e 22:30h UT do dia 20 de novembro de 2015.	130
Figura 7.4 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 2. As linhas vermelhas indicam a ocorrência de irregularidades ionosféricas próximo ao equador magnético.....	132
Figura 7.5 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 22:00h UT e 22:30h UT do dia 20 de novembro de 2015. As setas indicam a ocorrência de Spread-F.....	132
Figura 7.6 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 3. As linhas vermelhas indicam a ocorrência de irregularidades ionosféricas próximo ao equador magnético.....	134
Figura 7.7 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 02:00h UT e 02:30h UT do dia 21 de novembro de 2015. As setas indicam a ocorrência de Spread-F.....	134
Figura 7.8 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 4.....	136
Figura 7.9 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 04:00h UT e 04:30h UT do dia 21 de novembro de 2015. As setas indicam a ocorrência de Spread-F.....	136

Figura 7.10 - Bolha de plasma registrada pelo imageador localizado em Cachoeira Paulista, em 21/11/2015. As setas vermelhas indicam as regiões de depleção do plasma relacionadas a bolhas.	137
Figura 7.11 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 5.....	138
Figura 7.12 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 06:00h UT e 06:30h UT do dia 21 de novembro de 2015. As setas indicam a evolução temporal da ocorrência do Spread-F.	139

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Classificação de tempestades geomagnéticas de acordo com a faixa de variação do índice Dst.	22
Tabela 2.2 - Escala de variação dos valores índice Kp.....	23
Tabela 2.3 - Classificação da atividade geomagnética de acordo com os valores do índice Kp.....	23
Tabela 3.1 - Principais fatores que afetam os sinais dos sistemas GNSS.	54
Tabela 4.1 - Tabela de estados ionosféricos de acordo com os valores observados no índice LDIX.	76
Tabela 4.2 - Valores do coeficiente k para São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente calmos do ano de 2015.	78
Tabela 4.3 - Valores do coeficiente k para São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente perturbados do ano de 2015.	78
Tabela 5.1 - Diferenças entre os valores de LDIX calculados a partir das duas metodologias de obtenção do TEC, para cada um dos períodos apresentados.....	107

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AE	<i>Auroral Electrojet</i>
C/A	<i>Course/Acquisition</i>
CME	<i>Coronal Mass Ejection</i>
COSPAR	<i>Committee on Space Research</i>
CPA	Cachoeira Paulista - SP
DDEF	<i>Disturbance Dynamo Electric Field</i>
DIX	<i>Disturbance Ionosphere Index</i>
Dst	<i>Disturbance Storm Time</i>
EEJ	<i>Equatorial Electrojet</i>
EIA	<i>Equatorial Ionization Anomaly</i>
Embrace	Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial
EUS	Eusébio - CE
EUV	Extremo Ultravioleta
GFZ	<i>GeoForschungsZentrum</i>
GLONASS	<i>GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IMF	<i>Interplanetary Magnetic Field</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRI	<i>International Reference Ionosphere</i>
LDIX	<i>Local Disturbance Ionosphere Index</i>
LISN	<i>Low Latitude Ionospheric Sensor Network</i>
Loran	<i>Long-Range Navigation System</i>
LT	<i>Local Time</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MLAT	<i>Magnetic Latitude</i>
MMC	Média Móvel Centrada
Omega	<i>Global Low-frequency Navigation System</i>

P	<i>Precision</i>
PP	<i>Pierce Point</i>
PPEF	<i>Prompt Penetration Electric Field</i>
PRE	<i>Prereversal Enhancement</i>
PRN	<i>Pseudo-Random Noise</i>
Qd	<i>Quiet day</i>
RAMSAC	<i>Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RT	Raio Terrestre
SFU	<i>Solar Flux Unit</i>
SJK	São José dos Campos – Estação Virtual
SJSP	São José dos Campos – Estação GPS
SLZ	São Luís - MA
SSC	<i>Sudden Storm Commencement</i>
STEC	<i>Slant Total Electron Content</i>
SZA	<i>Solar Zenith Angle</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECMAP	<i>Total Electron Content MAP</i>
TECU	<i>Total Electron Content Unit</i>
USERE	<i>User Equivalent Range Error</i>
URSI	<i>Union Radio-Scientifique Internationale</i>
US DoD	<i>United States Department of Defense</i>
UT	<i>Universal Time</i>
VTEC	<i>Vertical Total Electron Content</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: A IONOSFERA E FENÔMENOS CORRELATOS.....	7
2.1 Estrutura da Ionosfera	7
2.2 Variabilidade do TEC ionosférico.....	10
2.2.1 Variação diária	10
2.2.2 Variação sazonal.....	14
2.2.3 Variação latitudinal.....	17
2.3 Fenômenos que afetam o TEC ionosférico.....	18
2.3.1 Irregularidades ionosféricas	18
2.3.2 Tempestades geomagnéticas	20
2.3.2.1 Penetração de campos elétricos na ionosfera	24
2.3.2.2 O dínamo perturbado.....	28
3 FUNDAMENTOS SOBRE OS SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: GPS E GLONASS	31
3.1 Histórico dos sistemas de posicionamento	31
3.2 O sistema GPS.....	32
3.2.1 Segmento espacial.....	32
3.2.1.1 Características dos sinais GPS.....	34
3.2.2 Segmento de controle	36
3.2.3 Segmento de usuários	37
3.3 O sistema GLONASS	38
3.3.1 Segmento espacial.....	38
3.3.1.1 Características dos sinais GLONASS.....	40
3.3.2 Segmento de controle	42
3.3.3 Segmento de usuários	43
3.4 Determinação do TEC a partir de dados de GNSS	43
3.4.1 Refração Ionosférica	43

3.4.2	Determinação do TEC a partir de medidas de código.....	49
3.4.3	Determinação do TEC a partir de medidas de fase	50
3.4.4	Cálculo do TEC vertical.....	52
3.5	Fontes de erros nos sistemas GNSS.....	53
4	O ÍNDICE DE PERTURBAÇÃO DA IONOSFERA: METODOLOGIA E ANÁLISE	55
4.1	DIX: o índice de perturbação da ionosfera.....	55
4.2	Dados utilizados no cálculo do índice	56
4.2.1	Receptores GNSS utilizados na rede Embrace/INPE	57
4.2.2	Metodologia de obtenção do TEC para os TECMAPs	58
4.2.3	Obtenção dos arquivos TECMAP	60
4.3	Pré-processamento dos dados de TEC.....	62
4.3.1	Determinação da Estação Virtual.....	62
4.3.2	Determinação do padrão diário de ionização	63
4.3.3	Exclusão de dias com ocorrência de irregularidades ionosféricas	65
4.4	Modificações na determinação do valor calmo de referência	68
4.5	Modificações na equação do DIX: introduzindo o LDIX.....	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES: CÁLCULO DO LDIX DURANTE PERÍODOS CALMOS E PERTURBADOS.....	81
5.1	Cálculo do LDIX durante períodos geomagneticamente calmos	81
5.1.1	Período de 12 a 17 de fevereiro de 2015.....	82
5.1.2	Período de 24 de abril a 01 de maio de 2015	84
5.1.3	Período de 02 a 07 de junho de 2015	86
5.1.4	Período de 24 de setembro a 01 de outubro de 2015.....	87
5.1.5	Período de 20 a 27 de novembro de 2015.....	89
5.2	Cálculo do LDIX durante períodos geomagneticamente perturbados	90
5.2.1	Tempestade geomagnética de 07 de janeiro de 2015	91
5.2.2	Tempestade geomagnética do dia de St. Patrick.....	93
5.2.3	Tempestade geomagnética de 22 de junho de 2015	96
5.2.4	Tempestade geomagnética de 07 de outubro de 2015.....	97
5.2.5	Tempestade geomagnética de 20 de dezembro de 2015	99

5.3 Validação do LDIX utilizando dados de TEC da estação SJSP	100
5.4 Verificação da significância física do LDIX a partir do parâmetro foF2....	107
6 ESTUDO FENOMENOLÓGICO DAS VARIAÇÕES OBSERVADAS NO LDIX DURANTE DOIS PERÍODOS GEOMAGNETICAMENTE PERTURBADOS	113
6.1 Análise para a tempestade geomagnética do dia de St. Patrick.....	114
6.2 Análise para a tempestade geomagnética de 22 de junho de 2015	121
7 ESTUDO FENOMENOLÓGICO DAS VARIAÇÕES OBSERVADAS NO LDIX DURANTE UM PERÍODO GEOMAGNETICAMENTE CALMO.....	127
7.1 Análise para o período de 20 a 24 de novembro de 2015	128
8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	141
8.1 Conclusões	141
8.2 Trabalhos futuros.....	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

1 INTRODUÇÃO

A ionosfera é a região ionizada da atmosfera terrestre, sendo caracterizada principalmente por apresentar propriedades de um plasma fracamente ionizado. Esta camada ionizada encontra-se aproximadamente entre 60 e 1500 km de altura e está subdividida em regiões, de acordo com a densidade de elétrons e a composição química local (HAYMES, 1971).

Devido às suas propriedades, a ionosfera possui alta condutividade elétrica. Dessa forma, uma onda de rádio, ao se propagar pela ionosfera, terá sua velocidade e sua direção de propagação alteradas. Isso faz com que ocorram variações no tempo de trânsito da onda transionosférica. Tais variações ocorrem principalmente em função do índice de refração do meio, que, por sua vez, está diretamente relacionado ao Conteúdo Eletrônico Total (TEC, do inglês *Total Electron Content*) da atmosfera.

O TEC é definido como a quantidade de elétrons livres ao longo de uma coluna cilíndrica com seção transversal reta de 1 m^2 , orientada na direção zenital, cujas extremidades são delimitadas pelo satélite em órbita e um receptor na superfície terrestre (KERSLEY, 2004). O TEC é obtido principalmente a partir da análise dos efeitos da refração ionosférica. Esta medida, por sua vez, é determinada por meio da análise comparativa dos parâmetros de propagação de sinais transmitidos por satélites de Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS, do inglês *Global Navigation Satellite System*). Em particular, utilizam-se dados do Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning System*) e do Sistema de Navegação Global por Satélite (GLONASS, do russo *GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), levando em consideração a extensa cobertura da rede de satélites e a capacidade de mensuração da contribuição do conteúdo eletrônico plasmasférico no TEC (KANTOR, 1969; OTSUKA et al., 2002; MONICO, 2008).

O estudo das variações da magnitude do TEC possibilita a compreensão dos fenômenos físicos associados ao grau de ionização da ionosfera. O estado da ionosfera, de acordo com o comportamento esperado da curva de densidade de elétrons, pode ser classificado como calmo ou perturbado. A densidade

eletrônica ionosférica é influenciada por diversos fatores, tais como: o processo de fotoionização das partículas neutras, latitude, estação do ano, fase do ciclo solar dentre outros fenômenos que alteram diretamente a taxa de produção e a distribuição espacial do plasma ionosférico (NICOLET, 1945; LEICK, 1995; MATSUOKA, 2007).

As perturbações ionosféricas podem ser definidas como variações anormais observadas no TEC ionosférico. Particularmente, estas perturbações referem-se aos picos de densidade eletrônica causados por forte ionização local e às depleções associadas a regiões de baixa ionização. Tais perturbações têm forte influência sobre o desempenho de sistemas espaciais baseados em comunicação por radiofrequência (e.g. GPS, GLONASS, Galileo e Beidou). Alguns efeitos das perturbações ionosféricas podem incluir erros ocasionados por flutuações rápidas de fase e amplitude nos sinais dos satélites, além de interrupções na comunicação entre o satélite e o receptor (KLOBUCHAR, 1991).

Jakowski et al. (2006) apresentaram a primeira formulação do parâmetro denominado 'índice de perturbação da ionosfera' (DIX, do inglês *Disturbance Ionosphere indeX*), baseando-se na análise estatística de dados de TEC. O DIX foi concebido para quantificar o grau de perturbação da ionosfera e, a princípio, expressar a resposta local da ionosfera durante perturbações geomagnéticas de origem solar.

Portanto, este estudo teve como motivação a necessidade de quantificar com exatidão a resposta da ionosfera aos diversos fenômenos físicos que ocorrem a nível global e local, representando uma alternativa aos índices geomagnéticos, como o Kp e o Dst, que quantificam perturbações geomagnéticas.

Com a finalidade de quantificar a amplitude de perturbações ionosféricas em regiões da América do Sul, desenvolveu-se um novo índice, denominado 'índice local de perturbações ionosféricas' (LDIX, do inglês *Local Disturbance Ionosphere Index*). O novo índice foi desenvolvido a partir de modificações na

metodologia proposta por Jakowski et al. (2006), sendo apto a determinar o grau de perturbação da ionosfera durante a ocorrência de diversos fenômenos ionosféricos. Para isso, a metodologia escolhida baseou-se na modificação de diferentes parâmetros matemáticos e computacionais presentes na metodologia de referência, bem como a inclusão de novos termos na equação original. Desta forma, buscou-se uma parametrização coerente do índice ionosférico com relação à área de estudo e à fonte de dados.

Igualmente importante foi a classificação do grau de perturbação local da ionosfera durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados, feita a partir da definição de uma tabela de estados ionosféricos baseada no índice LDIX. Assim, buscou-se capacitar o índice para utilizá-lo como ferramenta de monitoramento ionosférico, observando o seu comportamento durante períodos selecionados e buscando relacionar os seus valores com fenômenos físicos observados a partir de outros instrumentos.

Finalmente, utilizou-se o índice LDIX para estudar as respostas ionosféricas observadas durante duas tempestades geomagnéticas extremas e um período geomagneticamente calmo. Com relação às tempestades geomagnéticas, evidenciou-se a ocorrência de campos elétricos de penetração durante a fase principal das tempestades, assim como dos campos elétricos do dínamo perturbado durante a fase de recuperação. Tais fatores indicaram que o LDIX é capaz de detectar a resposta ionosférica devida à fase de recuperação da tempestade geomagnética, ao contrário dos índices geomagnéticos (e.g. AE, Kp e Dst), nos quais essa resposta ionosférica não é identificável. Com relação ao período geomagneticamente calmo, foram detectadas no LDIX assinaturas de irregularidades ionosféricas associadas ao fenômeno Spread-F. Esses resultados indicam que o índice LDIX é capaz de detectar a resposta ionosférica devida à ocorrência de bolhas de plasma, um fenômeno capaz de causar diversos erros em sistemas de posicionamento e comunicação.

Esta dissertação foi dividida em oito capítulos e organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1: O presente capítulo traz uma breve apresentação dos conceitos abordados e descreve os objetivos e a motivação para a realização deste trabalho.
- Capítulo 2: Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos relacionados à ionosfera e a alguns fenômenos que nela ocorrem. Abordam-se os principais tópicos que compreendem a formação, composição, variabilidade do TEC e fenômenos associados às alterações nas propriedades da ionosfera.
- Capítulo 3: Este capítulo apresenta uma descrição geral dos conceitos associados aos sistemas GPS e GLONASS. Abordam-se os principais componentes dos sistemas, além das características dos sinais transmitidos por ambos. Em seguida, demonstram-se as equações gerais utilizadas no cálculo do TEC a partir dos parâmetros dos sistemas GNSS.
- Capítulo 4: Este capítulo traz uma descrição geral da metodologia utilizada no desenvolvimento do índice LDIX e dos parâmetros utilizados para a determinação do grau de perturbação da ionosfera. Descrevem-se também as etapas de obtenção e pré-processamento dos dados de TEC utilizados neste trabalho, assim como as abordagens empregadas na avaliação da exatidão do LDIX.
- Capítulo 5: Este capítulo apresenta os resultados e as discussões a respeito do cálculo do índice LDIX durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados. Apresentam-se também os resultados da avaliação da significância física do LDIX com relação ao parâmetro foF2, bem como a influência de dois diferentes métodos de obtenção do TEC no cálculo do LDIX.

- Capítulo 6: Este capítulo apresenta os resultados de um estudo fenomenológico das variações observadas no LDIX durante dois períodos geomagneticamente perturbados. Abordam-se os principais fenômenos que ocorrem durante tempestades geomagnéticas, assim como seus efeitos no LDIX.
- Capítulo 7: Este capítulo apresenta os resultados de um estudo fenomenológico das variações observadas no LDIX durante um período geomagneticamente calmo. Abordam-se alguns fenômenos ionosféricos de origem interna, assim como seus efeitos no LDIX.
- Capítulo 8: Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados e análises referentes a este trabalho. Apresenta-se também um panorama geral sobre o desenvolvimento do trabalho, assim como oportunidades de trabalho futuro nesta mesma linha de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: A IONOSFERA E FENÔMENOS CORRELATOS

Este capítulo apresenta uma descrição geral das características físicas e morfológicas da ionosfera terrestre. A Seção 2.1 apresenta uma breve descrição sobre a formação e a classificação da ionosfera de acordo com os seus principais elementos constituintes. A Seção 2.2 apresenta alguns dos principais conceitos necessários à compreensão da variabilidade temporal e espacial da concentração eletrônica ionosférica. A Seção 2.3 inclui a descrição de alguns dos fenômenos físicos que podem afetar diretamente a concentração e a distribuição de elétrons livres na ionosfera durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados.

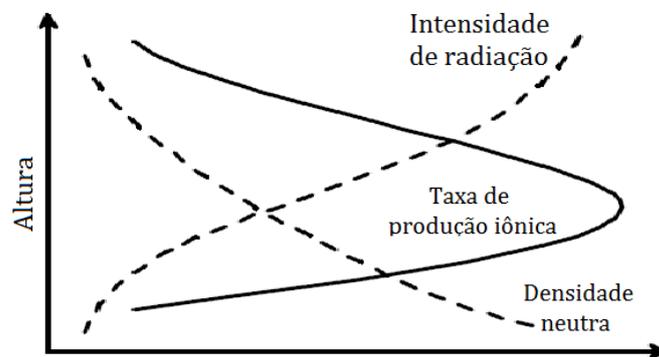
2.1 Estrutura da Ionosfera

A ionosfera é a região ionizada da atmosfera terrestre, produzida principalmente a partir da fotoionização dos constituintes atmosféricos neutros pela radiação solar na faixa do EUV (extremo ultravioleta). Esta parte ionizada da atmosfera terrestre está geralmente localizada entre 60 e 1500 km de altura. A altura de ocorrência dos limites verticais da ionosfera é afetada principalmente pela intensidade de radiação ionizante, que por sua vez está diretamente relacionada à fase do ciclo solar. O processo de ionização tem como resultado a produção de íons e elétrons livres, cuja distribuição espacial atribui à ionosfera características de um meio birrefringente. A ionização também pode ocorrer por meio de processos colisionais entre partículas energéticas carregadas. Neste caso, a ionização é denominada secundária ou corpuscular (KELLEY, 2009).

À medida que a radiação ionizante penetra nas regiões mais densas da atmosfera, a produção de pares íons-elétrons aumenta até atingir um nível máximo, denominado pico de ionização. Abaixo deste nível, a produção de elétrons tende a diminuir, pois embora a densidade de constituintes neutros aumente, a maior parte da radiação já foi absorvida e a taxa de perda eletrônica predomina sobre a taxa de produção (NEGRETI, 2012). Este

processo está ilustrado na Figura 2.1, na qual é possível observar que o ponto de intersecção entre as curvas de intensidade de radiação e densidade de constituintes neutros indica a taxa de produção iônica máxima, e, conseqüentemente, a região de maior densidade na ionosfera.

Figura 2.1 - Perfil vertical da taxa de produção de íons na ionosfera, relacionando altura, intensidade de radiação solar e densidade de constituintes atmosféricos neutros.

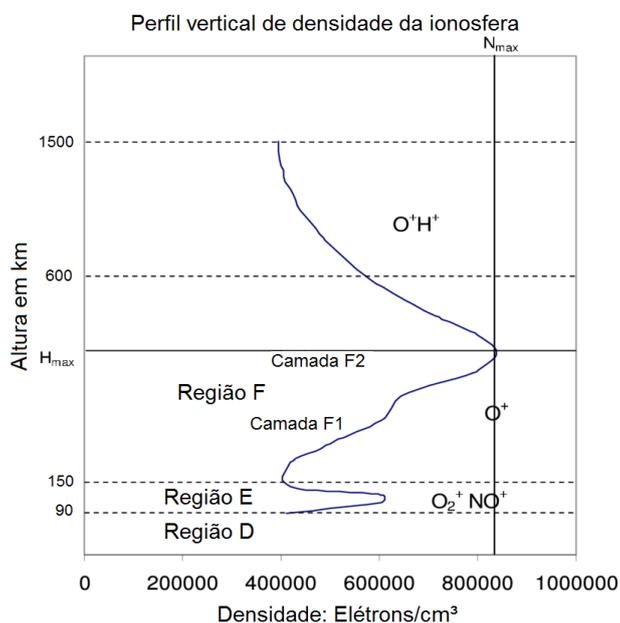


Fonte: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1997).

Devido às diferentes taxas de produção iônica e aos diferentes constituintes atmosféricos, é possível caracterizar as regiões ionosféricas de acordo com as suas propriedades locais, a partir da seguinte nomenclatura: regiões D, E e F (subdividida em camadas F_1 , F_2 e F_3), descritas a seguir (RISHBETH e GARRIOT, 1969; BALAN et al., 1997; BATISTA et al., 2002; SREEJA et al., 2010).

A Figura 2.2 apresenta um perfil vertical de densidade eletrônica da ionosfera, assim como a denominação das regiões ionosféricas de acordo com a densidade eletrônica local. Adicionalmente, observam-se os principais íons presentes em cada região.

Figura 2.2 - Perfil vertical de densidade da ionosfera, contendo a nomenclatura e a localização das regiões ionizadas.



Fonte: Adaptado de Katamzi (2011).

As regiões ionosféricas são identificadas principalmente de acordo com a densidade eletrônica local, os íons dominantes e suas reações de produção. Estas regiões são denominadas da seguinte forma (KIRCHHOFF, 1991; KELLEY, 2009):

- **Região D:** está localizada entre 60 e 90 km de altura, aproximadamente. Esta região é formada principalmente a partir da interação da radiação solar na faixa dos Raios-X ($\lambda < 10 \text{ \AA}$) com os elementos NO , N_2 e O_2 . Tal processo produz os íons positivos NO^+ , O_2^+ e N_2^+ , a partir da reação $A + h\nu \rightarrow A^+ + e$, na qual A representa os constituintes neutros, $h\nu$ representa a energia do fóton, A^+ representa os constituintes ionizados, e e representa o elétron.
- **Região E:** esta região está localizada entre 90 e 150 km de altura, e é formada principalmente a partir da fotoionização dos constituintes neutros pelos Raios-X ($\lambda < 10 \text{ \AA}$). Os principais íons presentes na região E são O_2^+ e NO^+ , produzidos como resultado da ionização dos elementos O_2 e N_2 . O íon O_2^+ é

formado a partir da seguinte reação: $O_2 + h\nu \rightarrow O_2^+ + e$, enquanto que o íon NO^+ é formado em duas etapas: (a) $N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e$; e (b) $N_2^+ + O \rightarrow N + NO^+$.

• **Região F:** compreende as camadas F_1 , F_2 e F_3 , e está localizada entre 150 e 1500 km de altura, aproximadamente. Esta região é formada principalmente a partir da interação da radiação solar na faixa do EUV ($100 \text{ \AA} < \lambda < 1210 \text{ \AA}$) com o oxigênio atômico, a partir da seguinte reação: $O + h\nu \rightarrow O^+ + e$. Durante o dia, a região F se apresenta na forma de duas camadas (estratificações): F_1 e F_2 . Em alguns casos, é possível a ocorrência de uma terceira camada, a F_3 , particularmente na ionosfera equatorial e de baixas latitudes (BALAN e BAILEY, 1995; BATISTA et al., 2003). Relatos recentes indicam a formação de uma quarta estratificação durante períodos de máxima elevação da altura da Região F (TARDELLI e FAGUNDES, 2015).

2.2 Variabilidade do TEC ionosférico

2.2.1 Variação diária

A densidade eletrônica da ionosfera tende a variar diariamente de acordo com as taxas de produção e perda de pares íons-elétrons na atmosfera. A taxa de produção de elétrons livres pode ser calculada em função da altura da camada atmosférica e do ângulo zenital do Sol. Para isso, como modelo, utiliza-se a Função de Chapman (RISHBETH, 1988), caracterizada por um conjunto de relações matemáticas que descrevem a absorção da radiação solar pelos constituintes atmosféricos, levando em consideração os seguintes pressupostos:

- A radiação solar é considerada monocromática;
- A atmosfera apresenta estratificação plana, isotérmica e considera-se a aceleração da gravidade constante;
- A atmosfera é composta por um único constituinte gasoso ideal; e
- O coeficiente de absorção é constante.

Dessa forma, obtém-se o número de elétrons livres produzidos por unidade de volume por unidade de tempo, q , a partir da seguinte equação:

$$q(h) = \eta\sigma nI, \quad (2.1)$$

na qual h é a altura, η é a eficiência de ionização (número de elétrons por fóton absorvido), σ é a seção transversal de absorção do gás, n é a densidade do gás a ser ionizado e I é a intensidade de radiação monocromática.

A função de variação da intensidade de radiação solar apresenta característica exponencial e é dada por (KIRCHHOFF, 1991):

$$I = I_{\infty}e^{-\tau}, \quad (2.2)$$

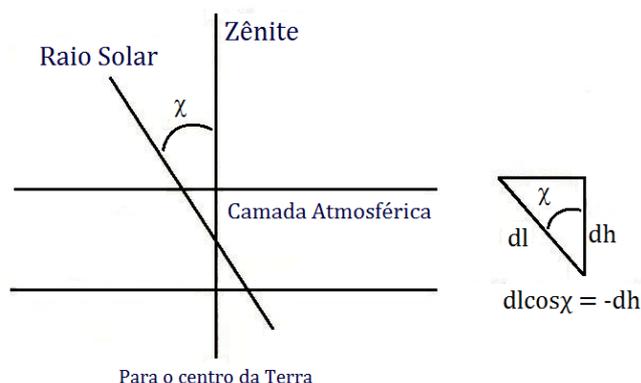
na qual I_{∞} é a intensidade inicial de radiação e τ é a profundidade ótica, cuja variação é dada por:

$$d\tau = \sigma n dl, \quad (2.3)$$

na qual dl denota a distância ao longo do caminho de incidência de I na atmosfera.

A Figura 2.3 apresenta uma ilustração esquemática dos parâmetros geométricos de penetração solar na atmosfera, na qual identificam-se o ângulo solar zenital, χ , e a relação entre penetração ótica e altura da camada.

Figura 2.3 - Ilustração da geometria da penetração ótica do raio solar na atmosfera.



Fonte: Adaptado de Kirchhoff (1991).

A partir da geometria apresentada na Figura 2.3, verifica-se que a distância, dl , pode ser definida por:

$$-dl = dh \sec \chi. \quad (2.4)$$

Substituindo (2.4) em (2.3) e efetuando uma integração, obtém-se a profundidade ótica, τ :

$$\tau = \sigma n H \sec \chi. \quad (2.5)$$

Assim, efetuando as devidas substituições, pode-se definir a taxa de produção iônica como:

$$q(h, \chi) = \eta \sigma n I_{\infty} e^{-\sigma n H \sec \chi}. \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 é conhecida como Função de produção de Chapman.

A Figura 2.4 ilustra alguns perfis verticais de densidade eletrônica, obtidos empiricamente a partir da Função de produção de Chapman para alguns valores de χ . Observa-se um máximo de produção iônica em $\chi = 0$. À medida que o ângulo solar zenital (SZA, do inglês *Solar Zenith Angle*) aumenta, a produção iônica decresce e o pico de densidade eletrônica passa a ocorrer em alturas superiores.

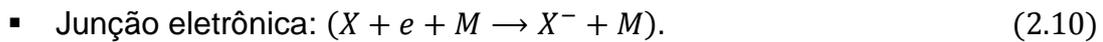
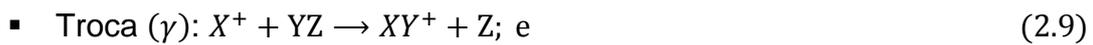
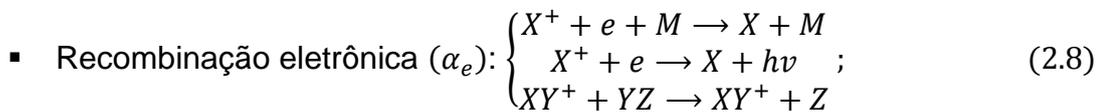
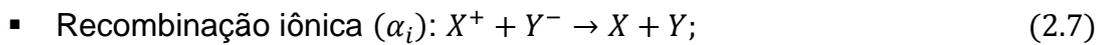
Figura 2.4 - Perfis verticais de densidade eletrônica da ionosfera para diversos valores do ângulo solar zenital (SZA).



Fonte: Adaptado de Cravens et al. (2004).

Com relação à taxa de perda iônica da ionosfera, ressalta-se que à medida que o período noturno se aproxima, o ângulo solar zenital aumenta e a intensidade da radiação solar diminui. Esses fatores, dentre outros, fazem com que a perda iônica passe a predominar sobre a produção, ocasionando uma diminuição na concentração eletrônica da ionosfera.

A perda iônica na ionosfera pode ocorrer por meio de diversos processos, dentre os quais podem-se destacar (KIRCHHOFF, 1991; SANTOS, 2013):



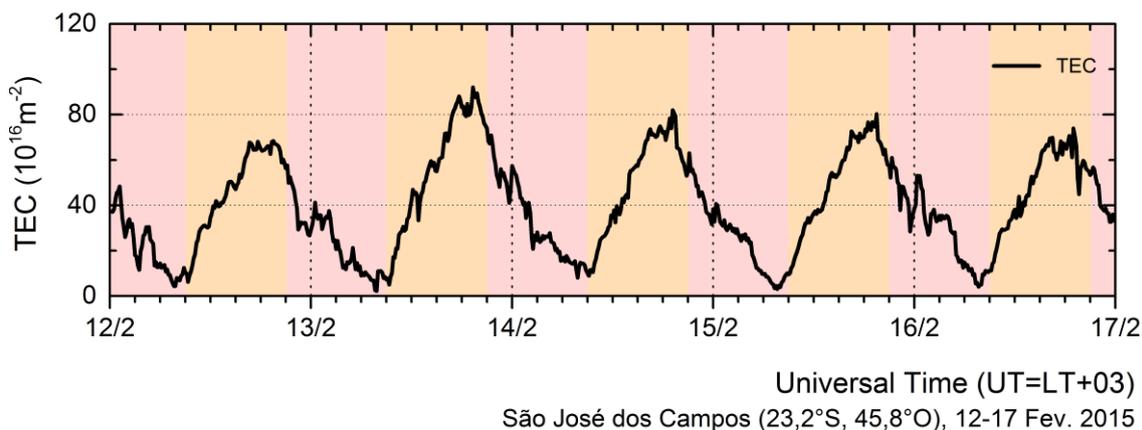
Nas Equações (2.7), (2.8), (2.9) e (2.10), X , Y e Z representam um átomo ou uma molécula, M é denominado “terceiro corpo”, denotando uma partícula neutra, hv representa a energia do fóton e e representa o elétron.

Devido à predominância de determinados íons sobre outras espécies, as perdas iônicas podem se comportar principalmente de duas formas (RISHBETH e GARRIOTT, 1969):

- Perda linear: ocorre quando os íons moleculares (m^+) predominam sobre os íons atômicos (n^+). A perda linear ocorre nas alturas inferiores da ionosfera (região D); e
- Perda quadrática: ocorre quando os íons atômicos (n^+) predominam sobre os íons moleculares (m^+). Este tipo de perda ocorre nas alturas superiores da ionosfera (regiões E e F).

Na Figura 2.5, ilustra-se o padrão de variação diária do Conteúdo Eletrônico Total durante o período de 12 a 17 de fevereiro de 2015, para a região ionosférica sobre São José dos Campos (23,2°S, 45,8°O).

Figura 2.5 - Variação temporal observada no TEC durante o período de 12 a 17 de fevereiro de 2015, obtido a partir de uma estação GNSS localizada em São José dos Campos. Os retângulos na cor rosa representam os períodos noturnos, e os retângulos na cor laranja representam os períodos diurnos.



Fonte: Produção do autor.

Nesta figura observa-se o comportamento característico da variação diária devida à produção e à perda de pares íons-elétrons na ionosfera. Nesse contexto, verifica-se que com o nascer do Sol a produção de elétrons se intensifica, atingindo um valor máximo próximo das 18:00h UT (15:00h LT). Em seguida, observa-se que a densidade de elétrons passa a diminuir. Após o pôr-do-sol, às 21:00h UT (18:00h LT), os processos de perda se intensificam, fazendo com que os menores valores de TEC ocorram próximo às 07:00h UT (04:00h LT).

2.2.2 Variação sazonal

Os valores de TEC observados durante os meses de verão são geralmente maiores do que os observados durante os meses de inverno, o que indica uma forte dependência da produção de elétrons livres na ionosfera com o ângulo de

incidência solar (NICOLET, 1945). No entanto, observa-se ainda que os valores de TEC amostrados durante os meses de equinócio apresentam maior amplitude quando comparados aos valores de TEC observados durante os meses de verão. Esse comportamento é denominado variação semianual e é associado principalmente à variação da intensidade do eletrojato equatorial (EEJ, do inglês *equatorial electrojet*).

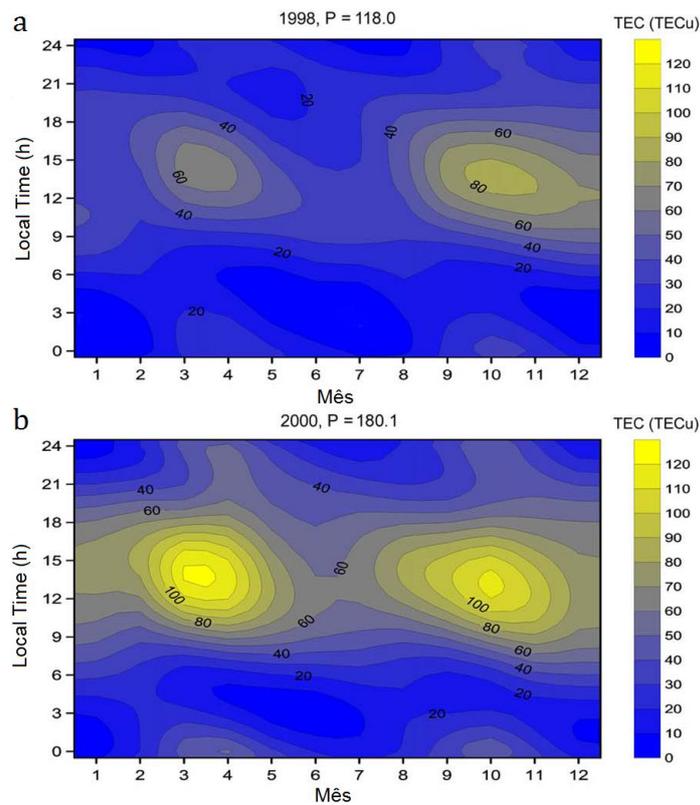
SCHERLIESS e FEJER (1999) observaram que as velocidades de deriva vertical diurna ($\vec{E} \times \vec{B}$) são maiores nos meses de inverno e equinócio do que nos meses de verão. Em contrapartida, o cosseno do ângulo zenital ao meio-dia é maior nos meses de verão, moderado nos equinócios e menor nos meses de inverno (NOGUEIRA, 2013). Dessa forma, associando a deriva vertical diurna ao cosseno do ângulo solar zenital ao meio-dia, o período do ano que apresenta maior equilíbrio entre ambos os parâmetros são os meses de equinócio. Portanto, durante o verão o cosseno do ângulo solar zenital ao meio-dia será maior, porém a deriva vertical do plasma ionosférico será menor. O mesmo ocorre para o inverno, onde a deriva vertical é maior, porém o cosseno do ângulo solar zenital ao meio-dia é menor.

Para o caso das regiões de interesse deste trabalho, espera-se que os valores de TEC apresentem um comportamento característico. Neste contexto, considerando regiões de médias e baixas latitudes, incluindo a região equatorial e a crista Sul da Anomalia Equatorial de Ionização (EIA, do inglês *Equatorial Ionization Anomaly*), os valores de TEC serão maiores nos meses de inverno, moderados nos meses de equinócio e menores nos meses de verão, para as regiões abaixo da crista da EIA. Esse comportamento pode se alterar nas regiões próximas ao equador magnético, a depender da intensidade do EEJ, que tende a intensificar o deslocamento de plasma dessas regiões devido ao efeito fonte.

Na Figura 2.6, apresentam-se mapas indicando as variações temporais da magnitude do TEC durante os anos de (mapa 'a') 1998 e (mapa 'b') 2000, obtidos por meio de uma estação GPS localizada em Arequipa (16,5°S, 71,5°O). A letra P denota uma variável que representa a intensidade da

atividade solar. Esta variável é obtida a partir de uma função do índice de fluxo solar F10.7, sendo um bom indicativo para a intensidade do EUV, diretamente relacionada à produção de elétrons livres na ionosfera (LEE et al., 2010).

Figura 2.6 - Mapas da variação temporal do TEC durante os anos de (a) 1998 e (b) 2000, obtidos a partir de uma estação GPS localizada em Arequipa (16,5°S, 71,5°O),



Arequipa (16,5°S, 71,5°O)

Fonte: Adaptado de Lee et al. (2010).

Nesta figura, verifica-se que mesmo durante períodos de atividade solar mínima, com $P = 118$ (mapa 'a'), observam-se as variações sazonais características da região de baixas latitudes. Durante o ano 2000 (mapa 'b'), no qual a atividade solar chega próximo ao máximo do ciclo solar 23 ($P = 180$), observa-se com maior clareza a ocorrência dos máximos de concentração eletrônica durante os meses de equinócio.

2.2.3 Variação latitudinal

Em nível global, a estrutura da ionosfera não é homogênea. Devido a essa característica, a ionosfera é classificada a partir de propriedades e fenômenos distintos observados em três principais regiões (MATSUOKA, 2007; ROMERO-HERNANDEZ et al., 2018):

- Região de médias latitudes: está localizada entre a região equatorial e a região de altas latitudes. Esta região é geralmente classificada como a extensão ionosférica situada entre 30°N e 50°N MLAT, e entre 30°S e 50°S MLAT. Contudo, Kintner et al. (2008) definem a região de médias latitudes como a extensão da ionosfera que não é afetada nem por fenômenos subaurorais ou por fenômenos equatoriais durante condições geomagneticamente calmas ou moderadas. A região de médias latitudes é a área da ionosfera que possui maior estabilidade temporal, apresentando parâmetros de concentração eletrônica que mais se aproximam dos modelos ionosféricos clássicos (RODRIGUES, 2003).
- Região de altas latitudes: não existe definição exata a respeito da localização da faixa limite da região de altas latitudes. Normalmente, a região de altas latitudes situa-se acima de 60° MLAT nos hemisférios Norte e Sul. No entanto, quando há intensa precipitação de partículas dentro da região auroral, devido aos efeitos do clima espacial, este limite pode se expandir para 55° MLAT ou menos (DENARDINI et al., 2016). Levando em consideração a configuração das linhas de campo magnético terrestre e o fluxo de partículas energéticas nessas regiões, observa-se um alto nível de irregularidades espaciais e temporais na concentração eletrônica ionosférica em altas latitudes (MCNAMARA, 1991).
- Região equatorial: está compreendida entre 30°N e 30°S MLAT, aproximadamente. Pode ainda ser subdividida em duas regiões: a região equatorial propriamente dita (entre 5°N e 5°S MLAT) e a região de baixas latitudes (entre 5°N e 30°N MLAT, e 5°S e 30°S MLAT) (BATISTA, 2003). Nessas regiões ocorrem os maiores níveis de

concentração eletrônica da ionosfera terrestre, bem como fenômenos ionosféricos característicos, como a Anomalia Equatorial de Ionização e as bolhas de plasma (BITTENCOURT, 1978).

2.3 Fenômenos que afetam o TEC ionosférico

2.3.1 Irregularidades ionosféricas

Ressalta-se que o TEC corresponde ao conteúdo eletrônico do plasma ionosférico, integrado no campo de visada entre o satélite e o receptor. Nesse contexto, fenômenos que ocorrem no plasma, ao atravessarem esse campo de visada, podem afetar o cálculo do TEC ionosférico. Dessa forma, a densidade de elétrons na ionosfera pode variar momentaneamente ou durante longos períodos. Portanto, as irregularidades ionosféricas são um dos fenômenos mais intensos que ocorrem no plasma ionosférico, afetando o TEC na região equatorial e de baixas latitudes.

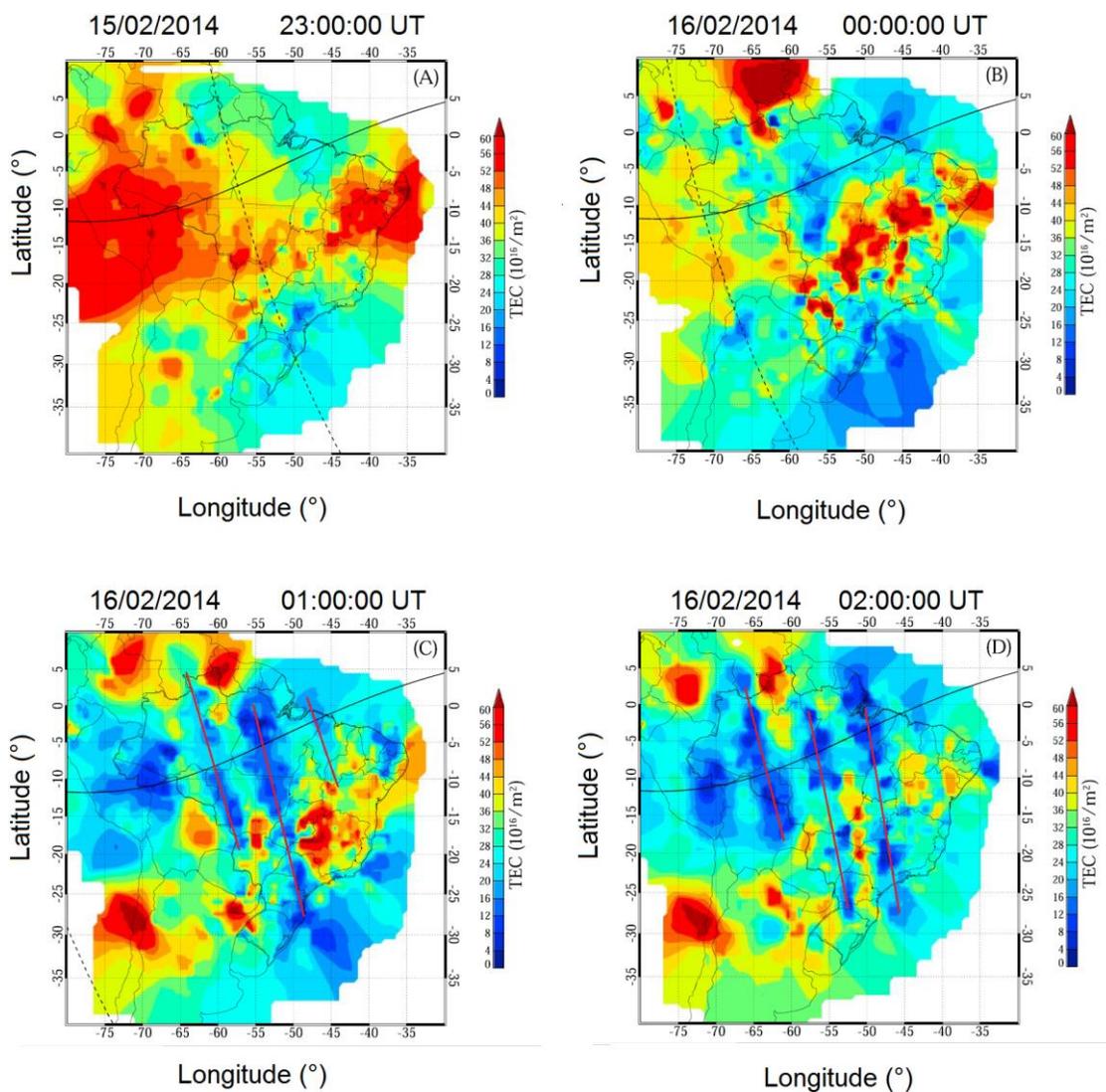
As irregularidades ionosféricas são regiões na ionosfera onde a densidade eletrônica difere de forma significativa da densidade de regiões adjacentes. Esses fenômenos surgem a partir de processos físicos complexos, causando efeitos indesejados em ondas transionosféricas. As irregularidades podem ser classificadas como positivas ou negativas, de acordo com a diferença de densidade. Oya et al. (1986) reportaram a ocorrência de anomalias positivas, denominadas “Blobs” de plasma. Porém, a categoria mais conhecida inclui as bolhas de plasma, que são regiões onde a densidade eletrônica diminui significativamente, a partir de depleções no plasma ionosférico.

A formação das bolhas ocorre de forma súbita, a partir de perturbações na atmosfera neutra que se propagam até a ionosfera. Essas perturbações resultam da evolução não linear das instabilidades Rayleigh-Taylor, no período após o pôr-do-sol (KELLEY, 1989). A propagação das instabilidades ocasiona um desequilíbrio entre os fluídos atmosféricos, cuja extensão pode variar desde centímetros até centenas de quilômetros (MAGDALENO et al., 2017). O fenômeno das bolhas de plasma pode durar desde minutos até várias horas, e

ocorre na região equatorial, onde a ionosfera pode apresentar diferenças de densidade de mais de duas ordens de grandeza.

Na Figura 2.7, apresentam-se mapas demonstrando a evolução temporal do TEC na ionosfera sobre a América do Sul, durante o dia 16 de Fevereiro de 2016. Nestes mapas observa-se a ocorrência de bolhas de plasma.

Figura 2.7 - Mapas de TEC da ionosfera sobre a América do Sul, exibindo a ocorrência de bolhas de plasma. As linhas vermelhas indicam as direções de extensão das bolhas, e a linha pontilhada representa o terminadouro solar em uma altura de 300 km.



Fonte: Adaptado de Takahashi et al. (2016).

De acordo com os mapas apresentados, verifica-se que às (A) 23:00h UT as bolhas de plasma são pouco perceptíveis, enquanto que nos horários seguintes, (B) 00:00h, (C) 01:00h e (D) 02:00h, um intenso gradiente longitudinal no TEC é observado, evidenciando as regiões de baixa densidade (cores frias) com relação às regiões de alta densidade (cores quentes).

2.3.2 Tempestades geomagnéticas

De forma similar aos fenômenos que cruzam a linha de visada entre o satélite e o receptor, quaisquer alterações no plasma são percebidas em maior ou menor intensidade na integração do conteúdo eletrônico ionosférico. Nesse contexto, as alterações de média e larga escala temporal associadas à variação solar também influenciam o cálculo do TEC. Essas variações no plasma ionosférico podem estar relacionadas à fase do ciclo solar (de larga escala) ou a processos “eruptivos”, que são associados à liberação de energia solar na forma de matéria e/ou radiação. Diante desses conceitos, sabe-se que além das emissões regulares de radiação eletromagnética, o Sol emite um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas, denominado vento solar (PARKER, 1958). A intensidade do fluxo do vento solar pode variar conforme o ciclo solar e os processos físicos que ocorrem no Sol. Nesse contexto, valores típicos da intensidade do fluxo solar podem variar entre ~60 e ~350 unidades de fluxo solar (SFU, do inglês *Solar Flux Unit*), considerando observações nos últimos 5 ciclos solares (ciclos 20 a 24). No entanto, esses valores podem ser intensificados durante a ocorrência de fenômenos eruptivos, tais como as Ejeções de Massa Coronal (CMEs, do inglês *Coronal Mass Ejections*) e as Explosões Solares.

No momento em que esses fenômenos interagem com a Terra, podem ocorrer as tempestades geomagnéticas, que são perturbações abruptas no campo magnético terrestre. Essas perturbações são ocasionadas por distúrbios decorrentes da intensificação da pressão gerada pelo vento solar sobre a magnetosfera, juntamente com os efeitos da reconexão magnética. As tempestades geomagnéticas ocorrem relacionadas à compressão das linhas de

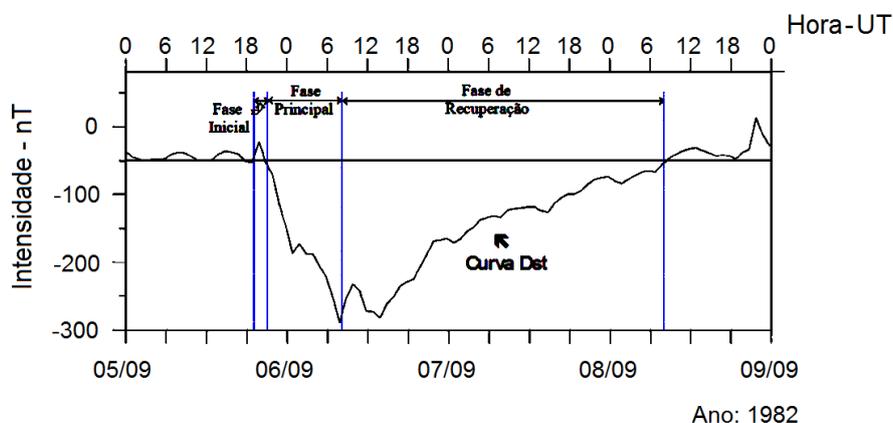
campo magnético da Terra no lado dia, ocasionando a diminuição da extensão da magnetopausa, que pode passar de 10 RT (Raios Terrestres) para 6 RT (KELLEY, 1989).

Uma das formas de se observar a ocorrência de tempestades geomagnéticas é por meio de índices geomagnéticos. O mais usual deles é o índice Dst, que é calculado a partir dos dados de uma rede de magnetômetros distribuídos próximos à região equatorial, e representa fisicamente a amplitude da energia total presente na corrente anelar (GONZALEZ et al., 1994). Este índice tem como principal propósito apresentar um grau de intensidade das perturbações que ocorrem no campo magnético terrestre, e é amplamente utilizado para analisar os efeitos das tempestades geomagnéticas na ionosfera (YAMASHITA, 1999; PIMENTA, 2002; RODRIGUES, 2003).

Antes do início de uma tempestade geomagnética, o índice Dst pode ou não apresentar um pico na sua intensidade, conhecido como fase inicial ou início súbito (SSC, do inglês *Sudden Storm Commencement*). Após esse pico, ocorre a fase principal (do inglês *main phase*) da tempestade, que é caracterizada pela queda brusca no valor do índice Dst. Logo após a intensidade do índice atingir um mínimo, os valores começam a subir, durante a fase de recuperação (do inglês *recovery phase*) da tempestade, até o Dst atingir 10% do valor mínimo ocorrido durante a fase principal, indicando o fim da tempestade (KAMIDE et al., 1998).

Na Figura 2.8, observa-se o comportamento característico da curva do Dst durante a ocorrência de uma tempestade geomagnética, no período de 05 a 09 de setembro de 1982. As linhas azuis verticais indicam o tempo de ocorrência das três fases da tempestade.

Figura 2.8 - Variação temporal típica do índice Dst durante a ocorrência de uma tempestade geomagnética. As linhas azuis indicam as diferentes fases da tempestade.



Fonte: Adaptado de Yamashita (1999).

Nesta figura, durante a fase inicial da tempestade geomagnética, observa-se um pico no índice Dst por volta das 19:00h UT. Em seguida, durante a fase principal da tempestade, o valor do Dst varia de -50 a -300 nT, em um intervalo de 10 horas. Na fase de recuperação, o Dst tende a se aproximar do valor inicial, observado antes da ocorrência da tempestade.

Com relação à intensidade das tempestades geomagnéticas, Gonzalez et al. (1994) apresentaram um método de classificação tendo como critério a faixa de variação do índice Dst durante a fase principal da tempestade. A Tabela 2.1 apresenta esta classificação:

Tabela 2.1 - Classificação de tempestades geomagnéticas de acordo com a faixa de variação do índice Dst.

Faixa de variação do Dst	Classificação da tempestade
$-50 \text{ nT} \leq Dst \leq -30 \text{ nT}$	Fraca
$-100 \text{ nT} \leq Dst \leq -50 \text{ nT}$	Moderada
$-200 \text{ nT} \leq Dst \leq -100 \text{ nT}$	Intensa
$Dst \leq -200 \text{ nT}$	Extrema

Fonte: Adaptado de Gonzalez et al. (1994).

Outro parâmetro utilizado para monitorar a atividade geomagnética é o índice K_p (SEPULVEDA, 2015; VALENTIM, 2015; BILIBIO, 2017; CARMO, 2018). O índice K_p é calculado a partir da média padronizada do índice K para 13 observatórios magnéticos distribuídos pelo globo terrestre. O índice K representa um parâmetro quase logarítmico para séries temporais de atividade geomagnética, caracterizando o desvio da componente horizontal (H) do campo magnético terrestre.

Na Tabela 2.2, apresenta-se a escala de variação dos valores do índice K_p.

Tabela 2.2 - Escala de variação dos valores índice K_p.

K _p	0o	0+	1-	1º	1+	2-	2o	2+	3-	3o	3+	4-	4o	4+
	5-	5o	5+	6-	6o	6+	7-	7o	7+	8-	8o	8+	9-	9o

Fonte: Adaptado de Rostoker (1972).

Na Tabela 2.3, apresenta-se uma classificação proposta por Wrenn et al. (1987) com o intuito de relacionar os valores do índice K_p ao estado momentâneo da atividade geomagnética.

Tabela 2.3 - Classificação da atividade geomagnética de acordo com os valores do índice K_p.

Faixa de variação do K _p	Classificação
$0 < Kp \leq 1$	Muito calmo
$1 < Kp \leq 2 -$	Calmo
$2- < Kp \leq 3 +$	Normal
$3+ < Kp \leq 4 +$	Perturbado
$4+ < Kp \leq 9$	Muito perturbado

Fonte: Adaptado de Wrenn et al. (1987).

2.3.2.1 Penetração de campos elétricos na ionosfera

Durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas, campos elétricos de convecção podem ser gerados na magnetosfera exterior pela interação do vento solar com o campo magnético interplanetário (IMF, do inglês Interplanetary Magnetic Field) (NOGUEIRA, 2013). Esses campos elétricos podem projetar-se ao longo das linhas do campo magnético terrestre em altas latitudes, propagando-se em direção às regiões de latitudes mais baixas (DENARDINI et al., 2011). A penetração desses campos pode causar variações significativas na distribuição global do conteúdo eletrônico ionosférico, afetando sistemas de comunicação e navegação por satélites.

A direção do vetor campo magnético interplanetário (\vec{B}_{SW}) é o principal fator que controla a ocorrência de tempestades geomagnéticas (KIVELSON e RUSSEL, 1995). Quando o IMF se inverte para o sul (eixo vertical), um potencial campo elétrico no sentido amanhecer-anoitecer se desenvolve na região polar terrestre, podendo penetrar nas latitudes equatoriais (SOBRAL et al., 1997). Este campo é dado pela seguinte relação (KELLEY, 2009):

$$\vec{E}_{SW} = -\vec{V}_{SW} \times \vec{B}_{SW}, \quad (2.11)$$

na qual \vec{E}_{SW} e \vec{V}_{SW} representam o vetor campo elétrico interplanetário e o vetor velocidade do vento solar, respectivamente.

Quando o IMF está orientado para o sul e o transporte do fluxo magnético descrito pelo campo \vec{E}_{SW} se estende para a magnetosfera através da reconexão magnética, surge um processo de convecção do plasma em direção à Terra, dado por $\vec{E} \times \vec{B}$. Dessa forma, a magnetosfera terrestre se encontra imersa em um campo elétrico interplanetário com sentido amanhecer-anoitecer, que favorece a penetração direta de campos elétricos, plasma e energia do vento solar (MORO, 2015).

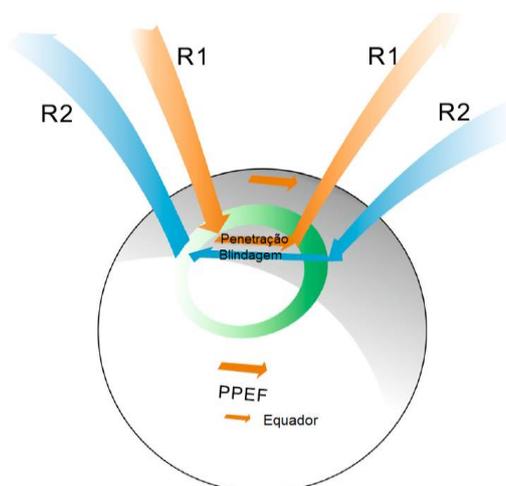
Quando surge um campo elétrico de convecção na magnetosfera, ocorre um desequilíbrio de cargas na plasmasfera. Este comportamento gera um campo elétrico de polarização, que tende a anular o campo magnetosférico a partir do processo de blindagem (do inglês *shielding*) da região denominada camada de Alfvén (SEPULVUEDA, 2015).

Os termos *undershielding* e *overshielding* representam duas situações de desequilíbrio observadas nos processos que ocorrem na interface magnetosfera-plasmasfera (WOLF et al., 2007).

- Quando o IMF está orientado para o sul, o campo elétrico amanhecer-noitecer se intensifica, o que corresponde a um campo elétrico para leste no lado dia e para oeste no lado noite. Esta condição é conhecida como *undershielding* e ocorre quando o campo elétrico de convecção gerado na magnetosfera é maior do que o campo elétrico de blindagem gerado na plasmasfera.
- Quando o IMF se inverte rapidamente para o norte, acompanhado de outros processos na região auroral, um campo elétrico denominado *overshielding* penetra na magnetosfera interna. Esta condição é originada a partir da interrupção do campo elétrico de convecção logo após a inversão do IMF, fazendo com que o campo elétrico de blindagem prevaleça. Isso faz com que os campos elétricos de penetração revertam sua direção, ou seja, para oeste durante o dia e para leste durante a noite (KELLEY et al., 1979).

Na Figura 2.9, apresenta-se uma ilustração dos processos que compreendem a penetração e a blindagem de campos elétricos na ionosfera.

Figura 2.9 - Ilustração dos processos de penetração e blindagem de campos elétricos na ionosfera terrestre.



Fonte: Adaptado de Wei et al. (2015).

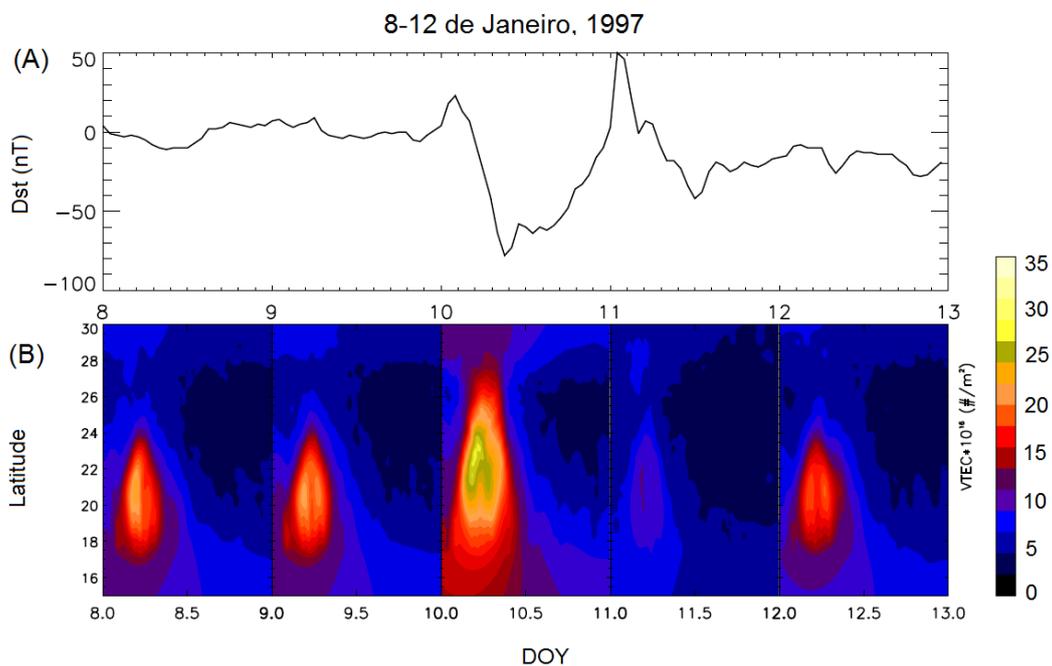
Neste contexto, os campos elétricos se comunicam com a ionosfera através das correntes alinhadas ao campo geomagnético, na Região 1 (R1) e na Região 2 (R2). Como ilustrado na figura, o campo elétrico de penetração está associado a R1, enquanto que o campo elétrico de blindagem está associado a R2. O resultado é um campo elétrico de penetração direta (PPEF, do inglês Prompt Penetration Electric Field) no sentido amanhecer-anoitecer (*undershielding*).

Os campos elétricos de blindagem atuam no sentido de reduzir a penetração dos campos elétricos em direção às médias e baixas latitudes (VALENTIM, 2015). Porém, tais campos não são capazes de blindar totalmente a ionosfera e a plasmasfera nessas regiões durante períodos perturbados, fazendo com que a concentração e distribuição do Conteúdo Eletrônico Total sejam afetadas durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas.

Na Figura 2.10, ilustra-se o comportamento característico da ionosfera de baixas latitudes durante uma tempestade geomagnética, na qual observaram-se efeitos possivelmente associados à penetração de campos elétricos. Nesse

contexto, são apresentados os valores do índice Dst para o período de 08 a 12 de janeiro de 1997 (gráfico identificado pela letra 'a'), assim como (b) mapas contendo a distribuição do TEC durante o mesmo período, no intervalo de latitudes entre 15°N e 30°N.

Figura 2.10 - Variação temporal do (a) índice Dst e dos (b) mapas de TEC para a região ionosférica de baixas latitudes, durante a tempestade geomagnética do período de 08 a 12 de janeiro de 1997.



Fonte: Adaptado de Wu et al. (2004).

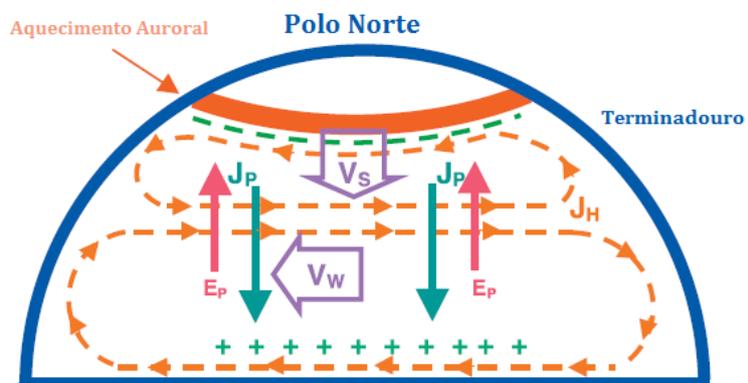
Nesta figura, observa-se que durante a fase principal da tempestade geomagnética (dia 10 de janeiro) há uma intensificação da EIA. Tal aumento ocorre, possivelmente, devido a um campo elétrico do tipo *undershielding*, que amplifica a deriva vertical do plasma ionosférico para cima em virtude da intensificação do efeito fonte. Esse comportamento faz com o plasma ionosférico seja deslocado para latitudes mais elevadas, provocando um alongamento na crista de ionização, cujo limite superior passa de 24°N para cerca de 28°N. Adicionalmente, a crista da EIA passa a apresentar um valor máximo de 26 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$) por volta das 12:50h LT.

2.3.2.2 O dínamo perturbado

Durante tempestades geomagnéticas, outro fenômeno que pode ocorrer é o dínamo perturbado, que está associado à injeção de energia magnetosférica em regiões de altas latitudes. Este processo provoca o aquecimento Joule do sistema ionosfera-termosfera, induzindo ventos termosféricos perturbados que se deslocam em direção à região equatorial (BLANC e RICHMOND, 1980; ABDU et al., 2006). Devido à rotação da Terra, os ventos perturbados são direcionados para oeste pela força de Coriolis. O movimento zonal dos íons, na presença do campo magnético terrestre, induz uma corrente Pedersen (J_P) que flui em direção ao equador e tende a carregar positivamente a ionosfera em baixas latitudes (VALENTIM, 2015). A ionosfera é carregada até o momento em que o fluxo de corrente seja interrompido pelo surgimento de um campo elétrico de polarização (E_p) direcionado para os polos. Com E_p sendo perpendicular a \vec{B} , surge uma deriva zonal do plasma ionosférico e uma corrente Hall (J_H), ambos para leste. A interrupção desta corrente nos terminadouros resulta em dois *loops* de corrente, produzindo um campo elétrico no sentido anoitecer-amanhecer de polaridade oposta ao dínamo ionosférico em períodos calmos (ABDU et al., 2006). Esse processo é denominado dínamo perturbado. Os campos elétricos perturbados ocorrem em geral entre 16 horas e 24 horas após o início de uma tempestade geomagnética e seus efeitos podem ser observados durante dias.

A Figura 2.11 ilustra o mecanismo de geração do dínamo perturbado. Nesta figura, observa-se a etapa inicial, onde ocorre o aquecimento auroral, seguida pela formação dos ventos termosféricos em direção ao equador (V_S) e para o oeste (V_W), assim como as correntes Pedersen (J_P) e Hall (J_H).

Figura 2.11 - Ilustração dos processos que compreendem o sistema de correntes do dínamo perturbado.



Fonte: Adaptado de Abdu et al. (2006).

3 FUNDAMENTOS SOBRE OS SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: GPS E GLONASS

Este capítulo apresenta conceitos fundamentais sobre os Sistemas de Navegação Global por Satélite. Neste contexto, o capítulo concentra-se no sistema GPS, que é a principal fonte de parâmetros para o cálculo dos dados de TEC utilizados neste trabalho, assim como no sistema GLONASS, que se encontra em atual fase de implementação para o cálculo de TEC no âmbito do Programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial do INPE (Embrace/INPE). A Seção 3.1 apresenta uma breve descrição sobre o histórico dos sistemas de posicionamento. A Seção 3.2 inclui os elementos que integram o sistema GPS. A Seção 3.3 apresenta as características do sistema GLONASS. A Seção 3.4 apresenta os principais conceitos relacionados ao cálculo do TEC a partir de dados de sistemas GNSS. A Seção 3.5 apresenta uma breve relação das fontes de erros dos sistemas GNSS.

3.1 Histórico dos sistemas de posicionamento

Com os avanços tecnológicos obtidos durante o período pós-Segunda Guerra Mundial (GEIGER, 1993), grande parte dos investimentos no setor das telecomunicações concentrou-se no desenvolvimento de sistemas capazes de inferir a posição de navegadores baseando-se nas características de propagação de ondas de rádio. Dentre os sistemas pioneiros de posicionamento, pode-se citar o Sistema de Navegação de Longo Alcance (Loran, do inglês *Long-Range Navigation System*) (PIERCE et al., 1948), e o Sistema de Navegação Global de Baixa Frequência (Omega, do inglês *Global Low-frequency Navigation System*) (SWANSON e TIBBALS, 1965). Esses sistemas apresentavam bom funcionamento em condições ideais, porém, em ambientes com barreiras físicas, tais como declives e vegetação densa, sua acurácia era reduzida drasticamente. Em adição, o alcance dos transmissores/receptores limitava-se às regiões costeiras, onde eram posicionadas as estações de apoio (MONICO, 2008).

Na década de 1970, com o advento dos satélites artificiais, os sistemas de posicionamento passaram a ter como foco o setor espacial, delineando o surgimento dos sistemas GNSS. Ainda nesse período, foi lançado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (US DoD, do inglês United States Department of Defense) o programa GPS (LASSITER, 1975). Este programa foi instituído com a proposta de colocar em órbita uma constelação de satélites capaz de cobrir toda a superfície do globo terrestre, fornecendo em tempo real as coordenadas do usuário receptor baseado em um sistema de referência. O GPS foi declarado completamente operacional em 27 de abril de 1995 (HEGARTY, 2017), com uma constelação de 24 satélites, fornecendo dados de latitude, longitude, altitude e tempo ao usuário.

O programa GLONASS lançou seu primeiro satélite em 1982 (DALY, 1988), na extinta União Soviética. Assim como o sistema americano, o GLONASS também foi desenvolvido para fins militares. Com a proposta inicial de atuar com um número mínimo de 24 satélites, o GLONASS foi declarado completamente operacional em 1995 (REVNIVYKH et al., 2017). Os satélites GLONASS foram projetados para transmitir seus sinais em bandas de frequência individuais, operando em órbitas que privilegiassem regiões localizadas em altas latitudes (MENZORI, 2017).

3.2 O sistema GPS

O sistema GPS é constituído por três elementos principais: o segmento espacial, que compreende a constelação de satélites; o segmento de controle, que inclui as estações de monitoramento; e o segmento de usuários, que corresponde aos dispositivos receptores (MONICO, 2008).

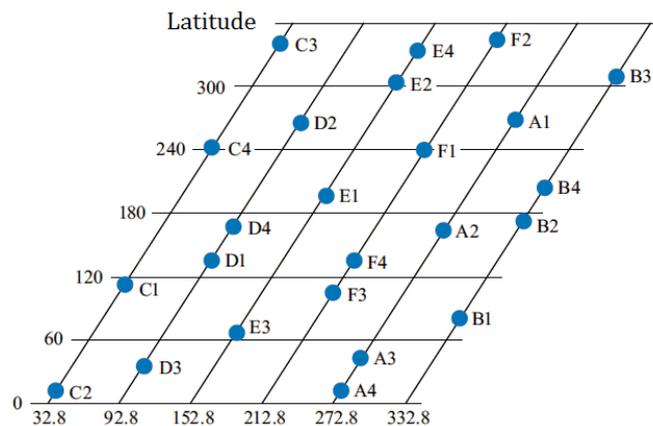
3.2.1 Segmento espacial

O segmento espacial corresponde à constelação de satélites GPS, que consiste em, no mínimo, 24 satélites em órbita média (MEO, do inglês *Medium Earth Orbit*). Os satélites são distribuídos em seis planos orbitais circulares com raio de 26.559 km (US DOD, 2008), incluindo quatro satélites em cada plano, a

uma altitude aproximada de 20.200 km. Os planos orbitais são identificados pelas letras A, B, C, D, E e F. A localização pontual dos satélites é denominada *slot*, sendo designada por um código alfanumérico (A1, por exemplo, para o primeiro *slot* do plano A). Os planos orbitais são inclinados 55 graus em relação ao plano equatorial, possuindo um período orbital de 12 horas siderais.

A Figura 3.1 ilustra um exemplo de configuração possível para os *slots* e as órbitas do sistema GPS com 24 satélites operacionais. Esta configuração assegura que pelo menos quatro satélites estejam em constante visada com o receptor GPS em qualquer ponto da superfície terrestre, garantindo uma conexão constante dos satélites com o receptor.

Figura 3.1 - Ilustração da distribuição dos satélites e planos orbitais do sistema GPS, juntamente com os *slots* identificados pelo código alfanumérico.



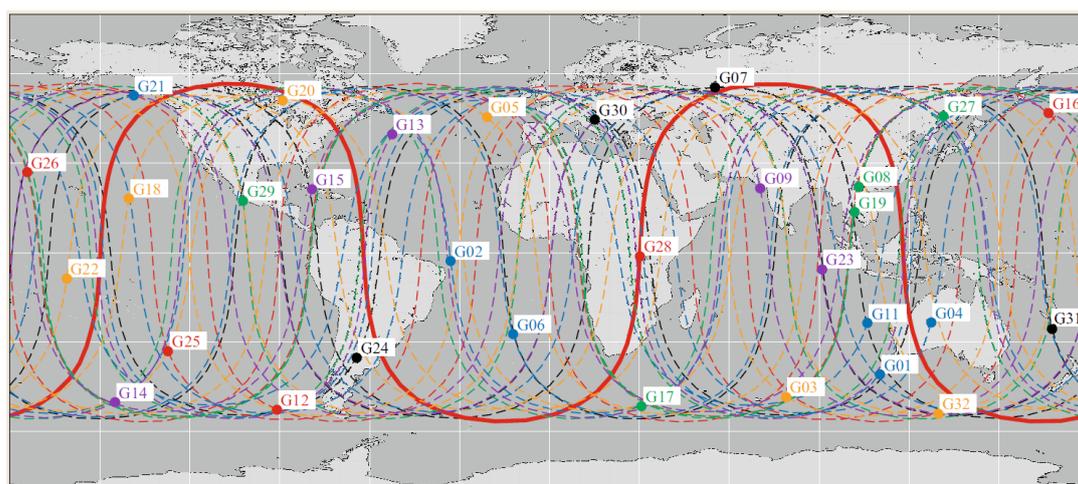
Fonte: Adaptado de Hegarty (2017).

A altitude orbital dos satélites do sistema GPS é definida em função da eficiência do sistema durante situações de operabilidade parcial. Adicionalmente, a altitude nominal é determinada em função do período necessário para que a posição relativa do satélite coincida com maior frequência, ampliando o alcance do sistema.

Nesse contexto, a Figura 3.2 representa a evolução diária das posições dos satélites GPS no plano cartográfico para o dia 01 de setembro de 2015, no

intervalo de 00:00h a 24:00h UT. Os pontos representam as posições dos satélites às 00:00h locais e as diferentes cores representam os seis planos orbitais (preto: A, vermelho: B, verde: C, azul: D, laranja: E, violeta: F).

Figura 3.2 - Mapa indicando a evolução temporal das posições dos satélites GPS em órbita. Cada cor representa um dos dois planos orbitais (preto: A, vermelho: B, verde: C, azul: D, laranja: E, violeta: F).



Fonte: Hegarty (2017).

3.2.1.1 Características dos sinais GPS

Cada satélite da constelação GPS transmite diversas ondas portadoras. Dentre as mais utilizadas, pode-se citar a L1, na frequência de 1575,43 MHz, e a L2, na frequência de 1227,60 MHz. Os códigos que compõem o ruído pseudoaleatório (PRN, do inglês *Pseudo-Random Noise*) são modulados com base nas ondas L1 e L2, a partir de uma variação de +1 ou -1. Esta configuração caracteriza um sistema binário, aparentando ter origem aleatória, e compõem os códigos Curso/Aquisição (C/A) e Precisão (P). Esses códigos possibilitam os cálculos de posicionamento, baseando-se nas efemérides dos satélites (MONICO, 2008). Os satélites GPS mais modernos contam com a integração de um terceiro sinal, de uso civil. Este sinal é atribuído a uma nova onda portadora, e ambos são denominados como L5 (VAN-DIERENDONCK et al., 2000).

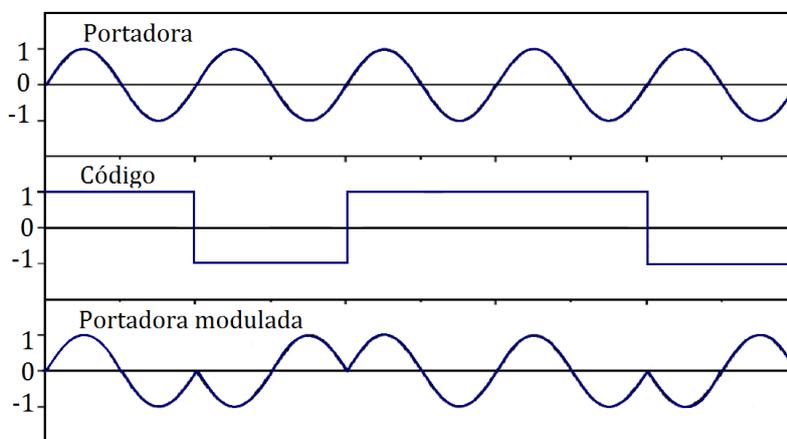
O código C/A consiste em uma modulação de 1023 bits sobre a onda portadora, com um período de 1 ms. Cada satélite transmite o seu próprio código C/A dentro um grupo de códigos pré-definidos em uma razão de 1023 MHz, com baixa correlação entre si. Isto possibilita a fácil distinção entre os sinais emitidos pelos diferentes satélites. O C/A é detectado por receptores GPS de uso civil, e não possui criptografia.

O código P é transmitido a 10,23 MHz, com uma sequência de $1,02 \times 10^7$ dígitos binários por segundo. Essa configuração garante uma precisão muito maior do que a proporcionada pelo código C/A. O sinal do código P é restrito ao uso militar nos EUA.

Além dos códigos C/A e P, os satélites da constelação GPS também transmitem mensagens de navegação. Tais mensagens fornecem informações importantes, como os parâmetros orbitais, os fatores para correções atmosféricas, o erro dos relógios e o status dos sistemas embarcados.

A Figura 3.3 representa o processo de modulação dos códigos sobre as ondas portadoras do sistema GPS. A modulação é feita por meio de um deslocamento de 180 graus na fase das ondas portadoras durante a mudança de estado, o que caracteriza uma modulação bifásica.

Figura 3.3 - Ilustração do processo de modulação dos códigos sobre as ondas portadoras do sistema GPS.



Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof (1994).

A modulação das portadoras L1 e L2 pode ser obtida a partir das seguintes relações:

$$L1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos[\omega_1 t + \phi(t)] + \frac{a_1 C}{A(t) D(t) \sin[\omega_1 t + \phi(t)]}, e \quad (3.1)$$

$$L2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos[\omega_2 t + \phi(t)], \quad (3.2)$$

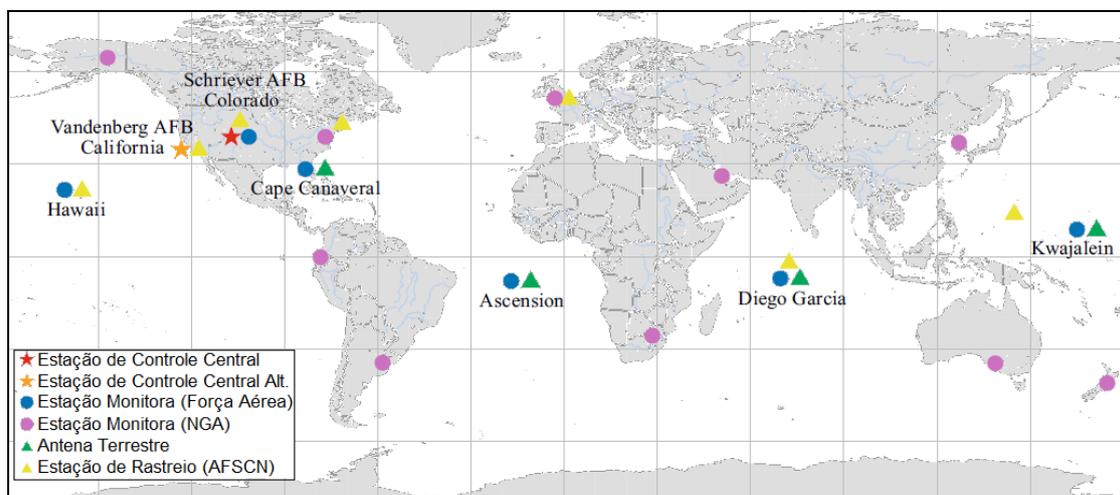
nas quais o termo $a_i \cos[\omega_i t + \phi(t)]$ representa a portadora não-modulada, $D(t)$ contém a mensagem de navegação, e $P(t)$ e $C/A(t)$ representam as sequências de pulsos dos códigos P e C/A, respectivamente. O termo $\left[\frac{a_1 C}{A(t) D(t) \sin[\omega_1 t + \phi(t)]} \right]$ indica que o código C/A é modulado com um deslocamento de 90 graus em relação ao código $P(t)$. O termo ω_i representa a frequência angular da portadora e $\phi(t)$ representa o ruído da fase.

3.2.2 Segmento de controle

Os satélites do sistema GPS são controlados e monitorados por uma rede global de estações terrestres, caracterizando o segmento de controle do sistema. Este segmento inclui uma estação central, localizada na Base da Força Aérea de Schriever (38,48°N, 104,31°O), bem como uma rede global de estações de monitoramento e antenas terrestres. Nesse contexto, as estações monitoras possuem receptores GPS de alta precisão, tendo como função monitorar, corrigir e realizar prognósticos sobre a integridade do sistema GPS.

A Figura 3.4 indica a localização da estação central e das estações monitoras do sistema GPS. Cada estação monitora rastreia de forma contínua os satélites visíveis a partir de antenas fixas, retransmitindo os dados para a estação central via radiofrequência. A estação central recebe, processa e retransmite os dados para as demais estações monitoras, que transmitirão aos receptores as atualizações em *broadcast* contendo eventuais correções dos parâmetros de posicionamento.

Figura 3.4 - Localização geográfica das estações do segmento de controle do sistema GPS.



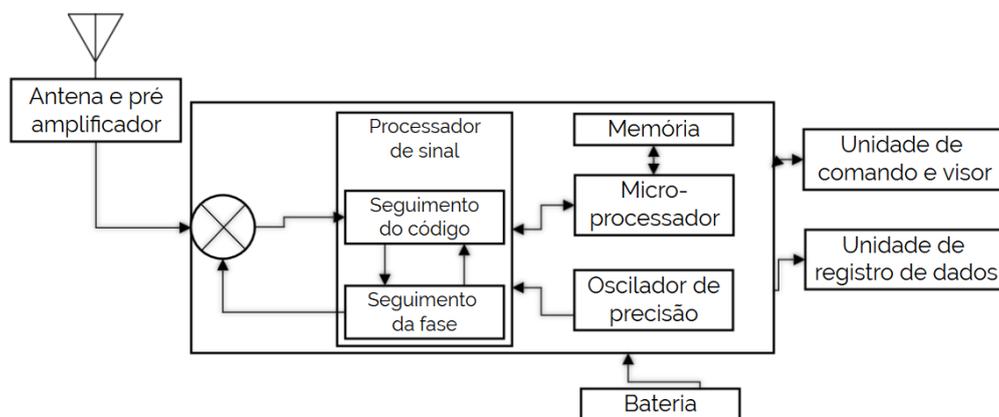
Fonte: Adaptado de Hegarty (2017).

3.2.3 Segmento de usuários

O segmento de usuários corresponde aos receptores capazes de obter e interpretar os dados do sistema GPS, tendo eles aplicações civis ou militares. De acordo com o modelo e a finalidade, podem-se citar diversos tipos de receptores. No entanto, os mais conhecidos são os modelos náuticos, automotivos, de “bolso” e os receptores geodésicos.

A Figura 3.5 apresenta um diagrama de blocos contendo os principais componentes de um receptor GPS. O receptor GPS é composto basicamente por antena e pré-amplificador, processador de radiofrequência e canalizador, microprocessador, relógio de precisão, interface de usuário (*software e display*), bateria e módulos de comunicação e armazenamento de dados.

Figura 3.5 - Diagrama de blocos ilustrando os principais componentes de um receptor GPS.



Fonte: Produção do autor.

3.3 O sistema GLONASS

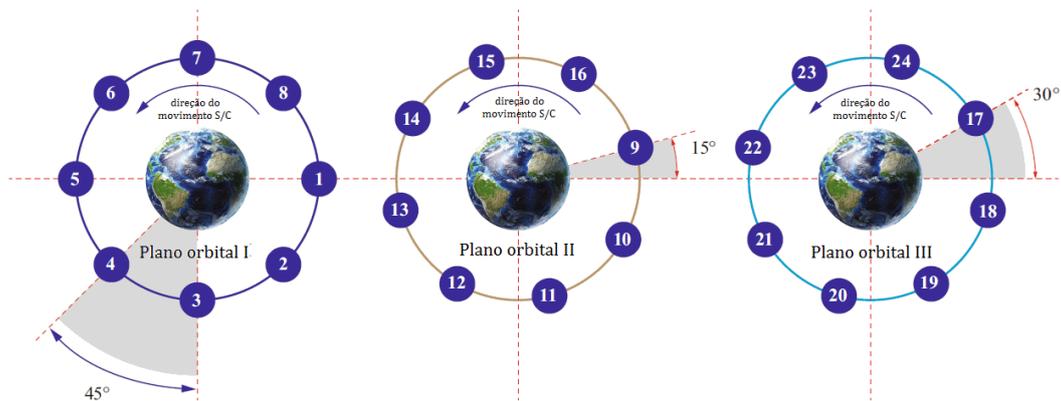
Assim como o GPS, o sistema GLONASS é constituído por três elementos principais: o segmento espacial, o segmento de controle e o segmento de usuários (MONICO, 2008).

3.3.1 Segmento espacial

O segmento espacial do sistema GLONASS é constituído por 24 satélites operacionais, distribuídos uniformemente em três planos orbitais, a uma altitude aproximada de 19.100 km. Cada satélite GLONASS é identificado por um *slot*, que define o seu plano orbital e a sua localização no respectivo plano. Os planos orbitais são inclinados em aproximadamente 64,8 graus em relação ao plano equatorial, possuindo um período orbital de 11 horas e 15 minutos siderais.

A Figura 3.6 ilustra as posições dos satélites GLONASS com relação aos seus planos orbitais. Os *slots* numerados de 1 a 8 pertencem ao plano orbital I, enquanto que os planos II e III compreendem os *slots* de 9 a 16, e 17 a 24, respectivamente.

Figura 3.6 - Slots e planos orbitais do sistema GLONASS.

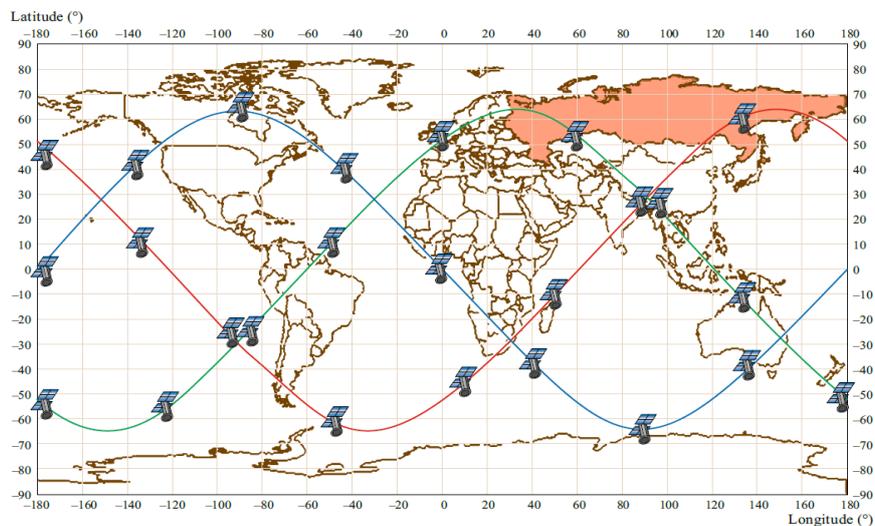


Fonte: Adaptado de Revnivykh et al. (2017).

O período orbital dos satélites GLONASS é determinado para que os satélites executem 17 voltas completas na Terra em um período de 8 dias. Além disso, o ponto inicial de cada órbita é variável com relação à superfície terrestre. Nesse contexto, todos os satélites se movem praticamente ao longo dos mesmos percursos, projetados no plano cartográfico.

A Figura 3.7 ilustra as posições dos satélites GLONASS projetadas no plano cartográfico. Cada linha representa uma das três órbitas. A região destacada na cor laranja representa o território da Federação Russa.

Figura 3.7 - Posições dos satélites GLONASS projetadas no plano cartográfico.



Fonte: Revnivykh et al. (2017).

3.3.1.1 Características dos sinais GLONASS

O GLONASS fornece duas categorias de serviços:

- Aberto, também denominado “posicionamento padrão”. Esta categoria opera com sinais não criptografados nas bandas L1, L2 e, recentemente, L3.
- Fechado, também denominado “posicionamento de alta precisão”. Esta categoria é de utilização exclusiva por usuários autorizados e opera com sinais criptografados nas bandas L1 e L2.

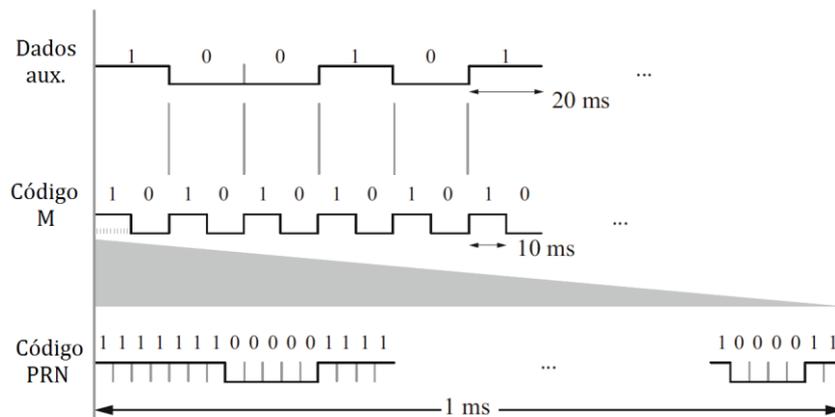
A banda L1 varia de 1592,95 MHz a 1610,48 MHz, enquanto que a banda L2 varia de 1242,93 MHz a 1248,62 MHz. Ao contrário do sistema GPS, os sinais do serviço aberto do sistema GLONASS não estão atualmente criptografados. Adicionalmente, ressalta-se que a opção de degradação proposital dos sinais do serviço aberto nunca foi considerada, desde a elaboração do projeto (REVNIVYKH et al., 2017). Tais características de acesso aos serviços do sistema GLONASS permitiram o desenvolvimento de receptores precisos, integrados com detectores de dupla frequência. Contudo, o acesso aos sinais em sua totalidade deve ser utilizado com cautela, visto que a utilização dos receptores de dupla frequência caracteriza uma funcionalidade não oficial, e pode ser inibida com as atualizações do sistema.

Diante do exposto, ressalta-se que cada satélite GLONASS transmite os sinais de ambos os serviços, aberto e fechado. O sinal de serviço aberto do GLONASS é gerado com base em uma chave binária de deslocamento, sendo transmitido nas frequências L1 e L2. As portadoras do sinal aberto são moduladas com base em uma sequência binária de três componentes individuais:

- O código PRN;
- As mensagens de navegação (código M); e
- Uma sequência de dados auxiliares.

A Figura 3.8 representa a estrutura do sinal aberto do sistema GLONASS. Os três componentes do sinal aberto são sincronizados entre si, e são modulados nas portadoras L1, L2 e L3.

Figura 3.8 - Ilustração da estrutura do sinal aberto do sistema GLONASS.



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

O sinal fechado do sistema GLONASS é transmitido em quadratura de fase com relação ao sinal aberto. Este sinal é destinado apenas a uso militar, e sua estrutura nunca foi divulgada publicamente. Contudo, alguns trabalhos científicos têm revelado importantes propriedades sobre o sinal, e correspondem à base do entendimento acadêmico atual sobre o posicionamento de alta precisão do GLONASS (DALE et al., 1987; LENNEN, 1989; BESER et al., 1993; DALY et al., 1994).

Com relação às ondas portadoras do sistema GLONASS, a L1 é dada pela seguinte relação (SEEBER, 2003):

$$L1 = f_0 + k\Delta f_{L1}, k = [0,1, \dots, 24], \quad (3.3)$$

na qual f_0 é a frequência inicial, equivalente a 1602 MHz, o termo Δf_{L1} corresponde à frequência de 0,5625 MHz e o índice k representa a numeração atribuída ao satélite, junto com o seu canal de transmissão. Neste parâmetro, $k = 0$ é utilizado apenas para testes.

Finalmente, a onda portadora L2 pode ser obtida a partir de uma função da portadora L1, dada pela seguinte equação (MONICO, 2008):

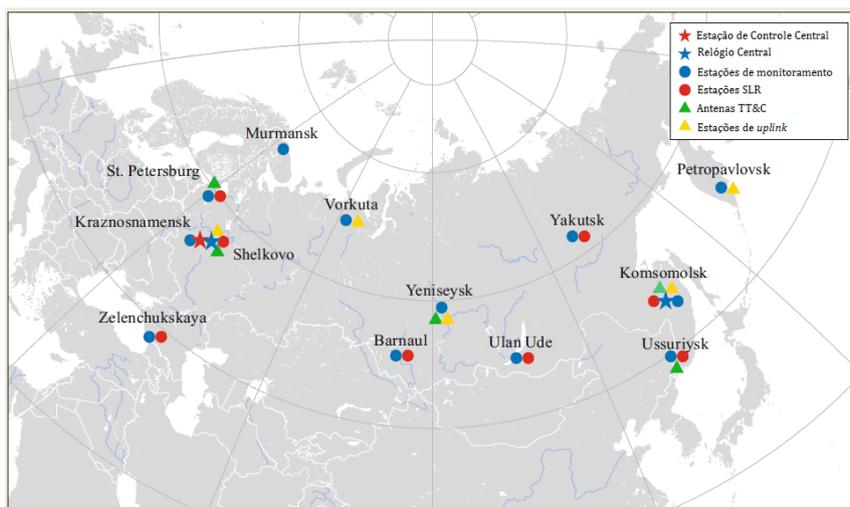
$$L2 = \frac{L1}{9/7}. \quad (3.4)$$

3.3.2 Segmento de controle

O segmento de controle constitui um elemento essencial do sistema GLONASS, proporcionando a plena operação do sistema por meio de estações terrestres situadas em diversas localidades do antigo território da União Soviética. Todos os procedimentos operacionais dos satélites, após o lançamento, são desempenhados pela Força de Defesa Aeroespacial Russa.

A Figura 3.9 indica a localização geográfica dos componentes do segmento de controle do sistema GLONASS. Os elementos principais incluem a Estação de Controle Central, os relógios centrais, as estações de telemetria, comando e rastreamento (TT&C), as estações de *uplink* e as estações de localização por laser (SLR).

Figura 3.9 - Localização geográfica dos componentes do segmento de controle do sistema GLONASS.



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

3.3.3 Segmento de usuários

O segmento de usuários do sistema GLONASS está diretamente associado aos receptores, assim como no sistema GPS. Porém, levando em consideração a popularidade do GPS, ressalta-se que os receptores GLONASS abrangem uma participação reduzida no mercado. Nesse contexto, a maioria dos aparelhos capazes de captar o sinal do sistema GLONASS é de receptores híbridos, capazes de detectar também os sinais do sistema GPS. Adicionalmente, os receptores GLONASS funcionam de maneira similar aos receptores do sistema GPS. Como as frequências do GPS e do GLONASS são relativamente próximas, é possível utilizar uma antena combinada e um amplificador comum no mesmo equipamento (MONICO, 2008). Isso tem facilitado o desenvolvimento de equipamentos capazes de rastrear satélites de ambos os sistemas simultaneamente.

3.4 Determinação do TEC a partir de dados de GNSS

3.4.1 Refração Ionosférica

Considera-se que, para uma onda eletromagnética monocromática, com comprimento de onda λ e frequência f , a sua velocidade de fase, v_f , pode ser dada a partir da seguinte relação (RODRIGUES, 2003; MONICO, 2008):

$$v_f = \lambda f. \quad (3.5)$$

Para o caso de um grupo de ondas, tal como os códigos GNSS modulados sobre uma portadora, a propagação da energia resultante pode ser definida pela velocidade de grupo, v_g , dada por:

$$v_g = -\frac{df}{d\lambda} \lambda^2. \quad (3.6)$$

A relação entre a velocidade de fase e a velocidade de grupo pode ser obtida por meio da diferenciação total da Equação 3.5, resultando na seguinte relação:

$$dv_f = f d\lambda + \lambda df. \quad (3.7)$$

A Equação 3.7 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{dv_f}{d\lambda} - \frac{f}{\lambda}. \quad (3.8)$$

Substituindo (3.8) em (3.6), teremos:

$$v_g = -\lambda \frac{dv_f}{d\lambda} + f\lambda. \quad (3.9)$$

A Equação 3.9 representa a função de Rayleigh (MONICO, 2008), e pode ser reescrita na seguinte forma:

$$v_g = v_f - \lambda \frac{dv_f}{d\lambda}. \quad (3.10)$$

A derivação implícita da Equação 3.9 fornece uma medida de dispersão, que representa a dependência da velocidade de fase em função do comprimento de onda. Em um meio não dispersivo, as velocidades de fase e de grupo são iguais, correspondendo à velocidade da luz no vácuo, c . A propagação de ondas em um determinado meio depende principalmente do seu índice de refração, n . A velocidade de propagação de uma onda, v , pode ser obtida a partir da seguinte relação:

$$v = \frac{c}{n}. \quad (3.11)$$

Substituindo a Equação 3.11 nas equações de velocidade de fase e de grupo é possível obter as funções de velocidade para os índices de refração de fase e de grupo, n_f e n_g :

$$v_f = \frac{c}{n_f}, \quad (3.12)$$

e

$$v_g = \frac{c}{n_g}. \quad (3.13)$$

Derivando a Equação 3.12 em função do comprimento de onda, λ , teremos:

$$\frac{dv_f}{d\lambda} = -\frac{c}{n_f^2} \frac{dn_f}{d\lambda}. \quad (3.14)$$

E substituindo as Equações 3.12, 3.13 e 3.14 na Equação 3.10, teremos a seguinte equação:

$$\frac{c}{n_g} = \frac{c}{n_f} + \lambda \frac{c}{n_f^2} \frac{dn_f}{d\lambda}, \quad (3.15)$$

que pode ser reescrita como:

$$\frac{c}{n_g} = \frac{c}{n_f} \left(1 + \lambda \frac{1}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right). \quad (3.16)$$

A Equação 3.16 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$n_g = n_f \left(1 - \lambda \frac{1}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right). \quad (3.17)$$

Aplicando a aproximação $(1 + \varepsilon)^{-1} = 1 - \varepsilon$ em (3.17), teremos:

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda}. \quad (3.18)$$

A equação anterior corresponde à função modificada de Rayleigh. Considerando $c = \lambda f$, teremos:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = -\frac{df}{f}. \quad (3.19)$$

Substituindo (3.19) na Equação 3.18, teremos:

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df}. \quad (3.20)$$

Considerando que a ionosfera atua como um meio dispersivo para os sinais GNSS, o índice de refração ionosférico de fase, n_f , pode ser aproximado pela seguinte série (SEEBER, 1993):

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots, \quad (3.21)$$

na qual os coeficientes c_2 , c_3 e c_4 dependem da densidade de elétrons livres ao longo do caminho de propagação da onda. Dessa forma, considerando somente a expansão até o termo quadrático, $\frac{c_2}{f^2}$, teremos:

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2}, \quad (3.22)$$

que corresponde ao índice de refração ionosférica de fase.

Derivando a Equação 3.22, obtemos:

$$dn_f = -2 \frac{c_2}{f^3} df. \quad (3.23)$$

Substituindo (3.22) e (3.23) em (3.20), teremos a seguinte equação:

$$n_g = 1 + \frac{c_2}{f^2} - f \frac{2c_2}{f^3}, \quad (3.24)$$

que também pode ser representada na seguinte forma:

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2}, \quad (3.25)$$

que corresponde ao índice de refração ionosférica de grupo.

Observa-se que os índices de refração de fase e de grupo se diferenciam somente no sinal do coeficiente c_2 . Esse coeficiente depende da densidade eletrônica, N_e , e é dado por (HARTMANN e LEITINGER, 1984):

$$c_2 = -40,3N_e. \quad (3.26)$$

Em unidades do SI, a constante 40,3 é dada em $mHz^2(el/m^2)^{-1}$ e N_e é dado em el/m^3 .

Assim, tem-se que:

$$n_f = 1 - \frac{40,3N_e}{f^2}, \quad (3.27)$$

e

$$n_g = 1 + \frac{40,3N_e}{f^2}. \quad (3.28)$$

As diferenças nos índices refração de fase e de grupo resultam em diferentes velocidades nos sinais, de modo que ocorre atraso no grupo e avanço na fase, pois a velocidade de grupo é menor do que a velocidade de fase (MONICO, 2008). Portanto, as distâncias obtidas a partir de medidas do código (fase) poderão ser maiores (menores) do que a distância real entre o satélite e o receptor. Nesse contexto, as distâncias obtidas a partir de medidas de código ou fase são denominadas pseudodistâncias, pois diferem da distância real.

A distância entre o (s) satélite e o (r) receptor é dada por:

$$S = \int_r^s nds, \quad (3.29)$$

na qual n representa, de forma geral, o índice de refração ionosférica de fase ou de grupo. A diferença entre a distância medida e a distância geométrica (ρ) é denominada refração ionosférica, I_r^s .

Tendo como exemplo o caso da fase da portadora, a refração ionosférica é dada por:

$$I_r^s(f) = \int_s^r \left(1 - \frac{40,3N_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (3.30)$$

ou, ainda:

$$I_r^s(f) = -\frac{40,3}{f^2} \int_s^r N_e ds, \quad (3.31)$$

na qual a parcela variável da equação caracteriza a densidade eletrônica ao longo do caminho de propagação do sinal, incluindo a inclinação da trajetória com relação ao ângulo zenital, denominada TEC oblíquo (STEC, do inglês *Slant Total Electron Content*):

$$STEC = \int_s^r N_e ds. \quad (3.32)$$

Dessa forma, tem-se:

$$I_r^s(f) = -\frac{40,3}{f^2} STEC, \quad (3.33)$$

ou, para o caso da refração ionosférica de grupo:

$$I_r^s(g) = \frac{40,3}{f^2} STEC. \quad (3.34)$$

3.4.2 Determinação do TEC a partir de medidas de código

As pseudodistâncias podem ser definidas para as portadoras L1 (ρ_1) e L2 (ρ_2) a partir das seguintes relações (TEUNISSEN e KLEUSBERG, 1996; MONICO, 2008):

$$\rho_1 = R + c\Delta\delta + \Delta_{g,L1}^{IONO} + \Delta^{TROP} + d_{\rho_1}^R + d_{\rho_1}^S + m\rho_1 + \varepsilon\rho_1, \quad (3.35)$$

e

$$\rho_2 = R + c\Delta\delta + \Delta_{g,L2}^{IONO} + \Delta^{TROP} + d_{\rho_2}^R + d_{\rho_2}^S + m\rho_2 + \varepsilon\rho_2, \quad (3.36)$$

nas quais R é a distância geométrica entre o receptor e o satélite, o termo $c\Delta\delta = c(\delta_S - \delta_R)$ representa o erro devido às variações dos relógios do (δ_S) satélite e do (δ_R) receptor em relação ao sistema de tempo GNSS, Δ^{IONO} é o erro devido à refração ionosférica; Δ^{TROP} é o erro devido à refração troposférica; d^R e d^S são os erros ocasionados pelos atrasos instrumentais de receptor e satélite, respectivamente, m é o erro devido ao efeito de multicaminhamento e ε é o erro devido ao ruído do receptor. Finalmente, o termo $\Delta_{g,L1}^{IONO}$ está relacionado ao atraso de grupo.

Subtraindo a Equação 3.36 da Equação 3.35, teremos:

$$\rho_2 - \rho_1 = \frac{1}{S} STEC_\rho + d_\rho^R + d_\rho^S + m\rho + \varepsilon\rho, \quad (3.37)$$

na qual S é um fator de conversão, dado por:

$$S = \frac{1}{40,3} \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} = 9,52 \times 10^{16} \text{ [elétrons/m}^3\text{]}, \quad (3.38)$$

na qual f_{L1} e f_{L2} correspondem às frequências das ondas portadoras L1 e L2, respectivamente.

Reescrevendo a Equação 3.37, teremos:

$$STEC_\rho = S[(\rho_2 - \rho_1) - d_\rho - m\rho - \varepsilon\rho]. \quad (3.39)$$

A Equação 3.39 fornece o valor do TEC oblíquo a partir da diferença entre as pseudodistâncias, $STEC_\rho$. O TEC oblíquo é influenciado pelo atraso instrumental do satélite e do receptor, além dos efeitos do multicaminhamento e do ruído do receptor. É possível reduzir esses efeitos realizando uma instalação adequada da antena de forma a evitar barreiras físicas e utilizando componentes eletrônicos de baixo ruído na fabricação do receptor.

3.4.3 Determinação do TEC a partir de medidas de fase

Outro método para a obtenção do TEC oblíquo, em função de medidas de fase, é descrito. As pseudodistâncias de fase (Φ) podem ser obtidas a partir da seguinte equação (TEUNISSEN e KLEUSBERG, 1996; MONICO, 2008):

$$\Phi = \lambda\phi = R + c\Delta\delta + \lambda N, \quad (3.40)$$

na qual ϕ é a diferença de fase (em ciclos) entre a portadora de referência gerada pelo receptor e a portadora transmitida pelo satélite GNSS, λ é o comprimento de onda da portadora; R é a distância geométrica entre o satélite e o receptor; $c\Delta\delta$ é o termo que representa o erro devido às variações dos relógios do (δ_S) satélite e do (δ_R) receptor com relação ao sistema de tempo GNSS, e N é a ambiguidade, resultante do desconhecimento do número total de ciclos contidos na trajetória do sinal desde o satélite até o receptor.

Considerando os efeitos da ionosfera, troposfera, atrasos instrumentais, multicaminhamento, ruído e ambiguidade, a Equação 3.40 pode ser reescrita na seguinte forma, para as portadoras L1 e L2:

$$\Phi_1 = R + c\Delta\delta + \Delta_{f,L1}^{IONO} + \Delta^{TROP} + \lambda_1 N_1 + d_{\phi_1}^R + d_{\phi_1}^S + m\phi_1 + \varepsilon\phi_1, \quad (3.41)$$

e

$$\Phi_2 = R + c\Delta\delta + \Delta_{f,L2}^{IONO} + \Delta^{TROP} + \lambda_2 N_2 + d_{\phi_2}^R + d_{\phi_2}^S + m\phi_2 + \varepsilon\phi_2. \quad (3.42)$$

Subtraindo (3.42) de (3.41), teremos:

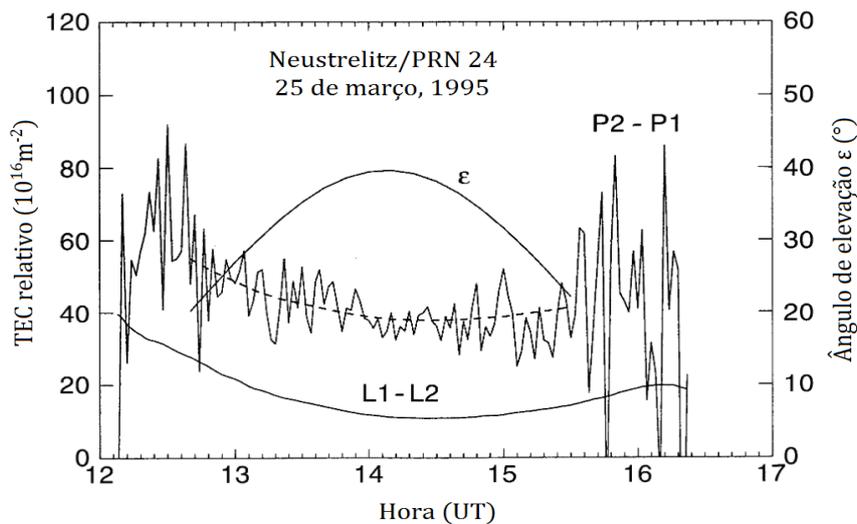
$$\Phi_1 - \Phi_2 = \frac{1}{S} STEC_\phi + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + d_\phi^R + d_\phi^S + m_\phi + \varepsilon_\phi. \quad (3.43)$$

Rearranjando a Equação 3.43, teremos:

$$STEC_\phi = S[(\Phi_1 - \Phi_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - d_\phi - m_\phi - \varepsilon_\phi]. \quad (3.44)$$

A Equação 3.44 fornece o valor do STEC a partir da diferença de fases, determinada a partir dos códigos em L1 e L2. Devido à ambiguidade, o $STEC_\phi$ representa um valor relativo, enquanto que o $STEC_\rho$ representa um valor absoluto, contudo, bastante ruidoso, como ilustra a Figura 3.10. Neste contexto, os valores de $STEC_\phi$ ($L_1 - L_2$) não representam o valor real do TEC oblíquo. Por isso, é necessário transformar os valores de $STEC_\phi$ em valores absolutos a partir dos valores de $STEC_\rho$ ($P_2 - P_1$), resultando em medidas absolutas (niveladas) com menor ruído.

Figura 3.10 - Ilustração do processo de nivelamento do STEC obtido a partir das medidas de pseudodistâncias ($P_2 - P_1$) e de fases ($L_2 - L_1$).



Fonte: Adaptado de Jakowski (1996).

O $STEC$ nivelado é obtido somando-se ao $STEC$ relativo o valor médio da diferença entre $STEC_\phi$ e $STEC_\rho$ (RODRIGUES, 2003):

$$STEC_{(nivelado)} = STEC_\phi + \langle STEC_\phi - TEC_\rho \rangle, \quad (3.45)$$

na qual $\langle \dots \rangle$ indica o cálculo da média para um determinado intervalo de tempo.

3.4.4 Cálculo do TEC vertical

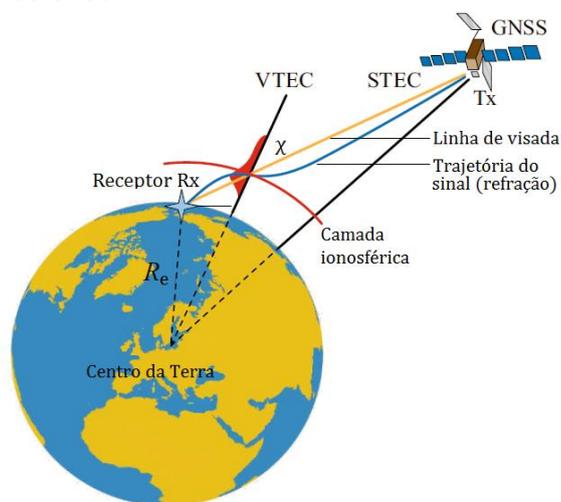
O cálculo do TEC vertical (VTEC, do inglês *Vertical Total Electron Content*) é útil, pois em certos estudos é necessário obter os valores de TEC para uma determinada localidade, levando em consideração a linha vertical acima da superfície terrestre neste ponto. Considerando a trajetória dos satélites GNSS e a frequência de amostragem dos dados, é possível calcular o VTEC para diversos pontos utilizando um só receptor, a partir da equação de conversão do STEC em VTEC. Diante do conceito de ionosfera estratificada, o VTEC pode ser definido como a projeção do STEC na vertical do ponto sub-ionosférico, situado no caminho de propagação do sinal entre o satélite e o receptor (JAKOWSKI, 1996). O VTEC é definido pela seguinte equação:

$$VTEC = \cos(\chi)STEC, \quad (3.46)$$

na qual $\cos(\chi) = \left[1 - \frac{R_e^2 \cos^2 E}{(R_e + h_m)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$, χ é o ângulo zenital no ponto sub-ionosférico, R_e é o raio da Terra, E é o ângulo de elevação do satélite, e h_m é a altura média do pico de densidade eletrônica da ionosfera (entre 350 e 400 km, aproximadamente).

A Figura 3.11 ilustra os parâmetros geométricos da trajetória de propagação do sinal GNSS transionosférico utilizado no cálculo do TEC vertical.

Figura 3.11 - Ilustração da geometria da trajetória de propagação do sinal GNSS transionosférico.



Fonte: Adaptado de Hobiger e Jakowski (2017).

3.5 Fontes de erros nos sistemas GNSS

Além dos efeitos da refração ionosférica, os sinais dos sistemas GNSS estão sujeitos à influência de diversos fatores que podem afetar os cálculos de posicionamento, assim como a precisão do TEC. Esses fatores podem ser atenuados através da utilização de técnicas apropriadas (FEDRIZZI, 1999; MONICO, 2008).

A Tabela 3.1 apresenta uma relação das principais fontes de erros e efeitos observados nos sinais dos sistemas GNSS, assim como o erro associado, tendo como referência o serviço aberto do sistema GPS. O efeito combinado dos erros, quando projetado sobre a linha de visada entre o receptor e o satélite, é denominado erro equivalente do usuário (UERE, do inglês *User Equivalent Range Error*).

Tabela 3.1 - Principais fatores que afetam os sinais dos sistemas GNSS.

FONTES	EFEITOS	ERRO (m)
Satélite	Erro no relógio	
	Erro orbital	3,6
	Atraso instrumental	
Propagação do sinal	Refração ionosférica	7,0
	Refração troposférica	0,7
	Multicaminho	1,2
Receptor	Erro no relógio	
	Centro de fase da antena	
	Atraso instrumental	1,5

Fonte: Adaptado de Monico (2008).

4 O ÍNDICE DE PERTURBAÇÃO DA IONOSFERA: METODOLOGIA E ANÁLISE

Este capítulo apresenta a metodologia adotada no desenvolvimento do índice LDIX. A Seção 4.1 apresenta a metodologia que foi utilizada como referência para o desenvolvimento do LDIX. A Seção 4.2 apresenta as características dos dados de TEC do Programa Embrace/INPE, utilizados neste trabalho. A Seção 4.3 apresenta as etapas de pré-processamento aplicadas aos dados de TEC para o cálculo do LDIX. As Seções 4.4 e 4.5 apresentam as modificações na metodologia de referência que caracterizaram a criação do LDIX.

4.1 DIX: o índice de perturbação da ionosfera

O DIX é um parâmetro proposto por Jakowski et al. (2006; 2012) com o objetivo de quantificar o grau de perturbação da ionosfera em diferentes condições geomagnéticas. Esta medida é obtida a partir da análise da variação do TEC com relação a um valor calmo de referência. Este, por sua vez, representa o comportamento esperado da curva de densidade eletrônica da ionosfera sob condições geomagneticamente calmas e é obtido originalmente a partir da média (ou mediana) mensal do TEC para um determinado horário de referência. Dessa forma, o DIX pode ser obtido a partir do valor absoluto da diferença entre o TEC mensurado e o valor calmo de referência, dividido pelo próprio valor de referência. Esse método resulta em um valor associado à variação percentual do TEC com relação ao valor calmo, estando diretamente relacionado às amplitudes das perturbações ionosféricas.

Originalmente, o DIX representa um parâmetro de classificação do estado momentâneo da ionosfera a nível espacial, sendo então denominado DIX regional (do inglês *Regional Disturbance Ionosphere indeX*). Nesse contexto, são calculadas médias espaciais dos valores de variação percentual do TEC obtido, com o intuito de analisar os efeitos de perturbações ionosféricas a partir de zonas de influência.

O DIX regional é calculado a partir da seguinte equação (JAKOWSKI et al., 2006):

$$DIX_{\text{regional}} = \sqrt{\left(\frac{1}{N_{grp} - 1}\right) \sum_{i=1}^{N_{grp}} \left((TEC_i - TEC_i^{med})/TEC_i^{med}\right)^2}, \quad (4.1)$$

na qual TEC_i é o TEC vertical calculado para um determinado ponto de observação, $i = (\text{latitude}, \text{longitude})$, o termo TEC_i^{med} representa o valor correspondente da média mensal e N_{grp} é o número de pontos de observação presentes em um mapa regional de TEC.

Contudo, para possibilitar o cálculo do DIX para pontos de observação individuais e localizados, descartou-se o termo espacial do DIX. Dessa forma, o DIX para uma única estação GNSS (ou ponto de observação) pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$DIX = \sqrt{\left((TEC_i - TEC_i^{med})/TEC_i^{med}\right)^2}. \quad (4.2)$$

A Equação (4.2) representa a metodologia de referência adotada neste trabalho para o cálculo do DIX.

4.2 Dados utilizados no cálculo do índice

Com o intuito de atender demandas internas e externas, o Programa Embrace/INPE tem desenvolvido os mapas regionais de TEC (TECMAPs, do inglês Total Electron Content MAPs) baseados em dados de GPS desde 2013 (TAKAHASHI et al., 2016). Os arquivos TECMAP para o continente Sul-Americano são gerados a cada 10 minutos, e são publicados diariamente no *website* do Embrace¹. Nesse contexto, ressalta-se que neste trabalho

¹ Disponível online em: <http://www.inpe.br/climaespacial>

utilizaram-se dados de TEC do Programa Embrace no cálculo do índice LDIX, bem como para o cálculo do índice DIX.

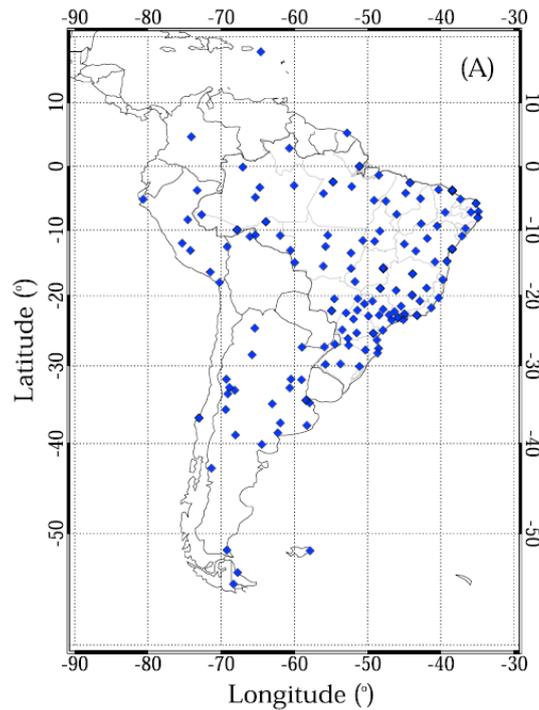
4.2.1 Receptores GNSS utilizados na rede Embrace/INPE

Os arquivos TECMAP do Programa Embrace são gerados periodicamente, a partir de dados obtidos por cerca de 140 receptores GNSS, localizados no território da América do Sul. Os receptores são parte integrante das seguintes redes (TAKAHASHI et al., 2016):

- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC);
- Rede de Sensores Ionosféricos de Baixa Latitude (LISN, do inglês *Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*);
- Rede Argentina de Monitoramento Contínuo de Satélites (RAMSAC, do espanhol *Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo*); e
- Serviço Internacional de GNSS (IGS, do inglês *International GNSS Service*).

A Figura 4.1 indica a localização geográfica dos receptores GNSS integrantes da rede Embrace. Os marcadores em azul representam as posições dos receptores GNSS. Utilizando os receptores das redes RBMC, LISN, RAMSAC e IGS, é possível mapear áreas extensas do Brasil, Peru, Chile e Argentina. Porém, em alguns países da parte central da América do Sul, como Bolívia e Paraguai, o número de estações é bastante reduzido.

Figura 4.1 - Localização geográfica dos receptores GNSS utilizados pela rede Embrace.



Fonte: Takahashi et al. (2016).

4.2.2 Metodologia de obtenção do TEC para os TECMAPs

O processamento dos dados de GPS e o algoritmo de cálculo do TEC são baseados no método desenvolvido por Otsuka et al. (2002).

Dentro do contexto dos mapas de TEC, o *STEC* representa o TEC sem a correção da inclinação da trajetória satélite-receptor, e é dado por (KANTOR et al., 2000; TAKAHASHI et al., 2016):

$$STEC = F[PD_{rL1}^S - PD_{rL2}^S] - (DCB_r + DCB_s + \varepsilon L1L2), \quad (4.3)$$

na qual PD_{rL1}^S e PD_{rL2}^S são as pseudodistâncias calculadas a partir das ondas portadoras L1 e L2, $\varepsilon L1L2$ representa o erro de medida das pseudodistâncias e DCB_r e DCB_s são os atrasos instrumentais devido ao receptor e ao satélite, respectivamente.

O termo F corresponde a uma função de frequências, e é dado pela seguinte relação:

$$F = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} = 9,5196, \quad (4.4)$$

na qual f_{L1}^2 e f_{L2}^2 são as frequências das portadoras L1 e L2, respectivamente.

A diferença entre as pseudodistâncias é dada pela seguinte relação:

$$[PD_{rL1}^S - PD_{rL2}^S] = \{c[DCB_r + DCB_s]\} + \left\{ \frac{40,3STEC(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)}{f_{L1}^2 f_{L2}^2} \right\} + \varepsilon L1L2, \quad (4.5)$$

na qual c é a velocidade da luz no vácuo.

Assim, o termo que relaciona a função de frequências com a diferença entre as pseudodistâncias é dado por:

$$F[PD_{rL1}^S - PD_{rL2}^S] = STEC + DCB_r + DCB_s + \varepsilon L1L2. \quad (4.6)$$

Isolando o termo $STEC$ na Equação 4.6, obtemos novamente a Equação 4.3:

$$STEC = F[PD_{rL1}^S - PD_{rL2}^S] - (DCB_r + DCB_s + \varepsilon L1L2).$$

O VTEC em função do ângulo descrito pela trajetória satélite-receptor é dado por:

$$VTEC = \cos(\chi)STEC, \quad (4.7)$$

na qual χ é o ângulo da trajetória satélite-receptor com relação à direção zenital.

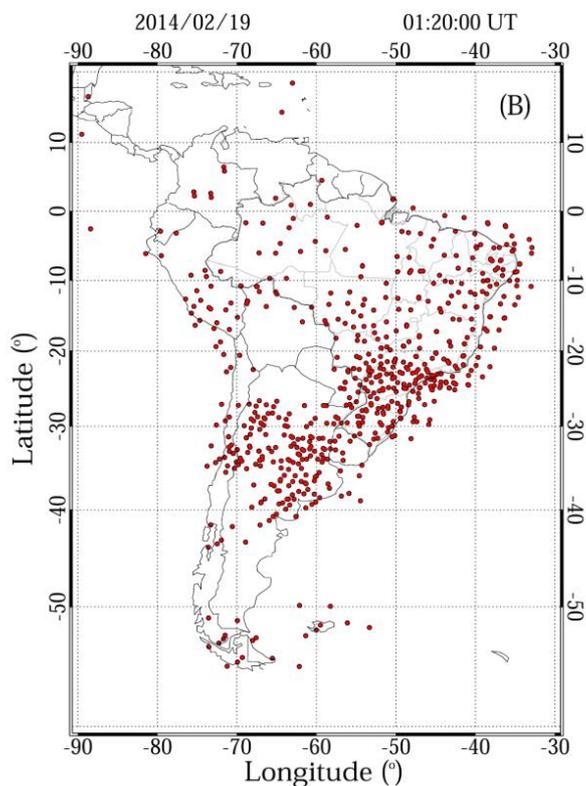
4.2.3 Obtenção dos arquivos TECMAP

O processo de obtenção dos mapas georreferenciados de TEC da rede Embrace constitui-se de três etapas: cálculo do TEC para cada receptor, geração da matriz de dados para o conjunto de receptores e geração do mapa interpolado de dados de TEC.

Geralmente, um receptor GNSS comunica-se simultaneamente com quatro a seis satélites, dentro de um ângulo de elevação acima de 30 graus. Para o caso dos TECMAPs do Programa Embrace, o número total de pontos de observação geralmente pode chegar a 650 (TAKAHASHI et al., 2016). Para cada ponto de observação, calcula-se a média temporal do TEC dentro de um período de 10 minutos, sobre os limites geográficos estabelecidos pelo ângulo de visada do receptor. Ao fim deste processo, é gerada uma matriz de valores de TEC para a região compreendendo os intervalos de latitudes entre 60°S e 20°N e de longitudes entre 30°O e 90°O, com espaçamento de 0,5 graus em latitude e longitude. Essa matriz, a princípio, apresenta diversas lacunas, devido à inexistência de observações em determinadas localidades. Nesse contexto, para aperfeiçoar a resolução espacial do TEC e possibilitar a cobertura de áreas mais extensas, é realizado um processo de interpolação a partir do cálculo de médias móveis para elementos de 3x3 células, caracterizando áreas de 160x160 km², aproximadamente (TAKAHASHI et al., 2016). Caso o elemento de 3x3 células não apresente dados suficientes, a área média de execução é expandida para 5x5 células, correspondendo a 260x260 km², aproximadamente. Desta forma, o elemento de média móvel pode se expandir para até 21x21 células, correspondendo a uma área de 1000x1000 km².

A Figura 4.2 ilustra um mapa com as observações da matriz georreferenciada de dados de TEC. Os marcadores em vermelho representam os pontos de observação (PP, do inglês, *Pierce Points*), definidos a partir da disponibilidade de dados para um determinado período.

Figura 4.2 - Exemplo de mapa de observações da matriz georreferenciada de dados de TEC, obtido para 01:20h UT do dia 19/02/2014.

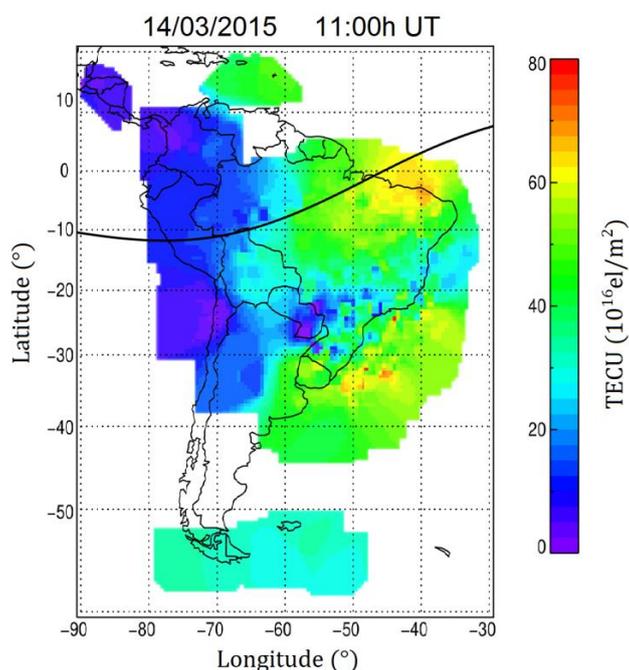


Fonte: Takahashi et al. (2016)

Após a suavização do conjunto de dados, os arquivos constituem matrizes de 120 colunas por 160 linhas, e passam a ser denominados TECMAPs. Nessas matrizes interpoladas, a primeira linha representa a latitude 60°S, a última linha representa a latitude 20°N, a primeira coluna representa a longitude 90°O, e a última coluna representa a longitude 30°O, com uma separação de 0,5 graus entre as células da matriz.

A Figura 4.3 apresenta um exemplo de TECMAP, obtido para 11:00h UT do dia 14 de março de 2015.

Figura 4.3 - Exemplo de TECMAP da ionosfera sobre a América do Sul, obtido para 11:00h UT do dia 14/03/2015.



Fonte: Produção do autor.

4.3 Pré-processamento dos dados de TEC

4.3.1 Determinação da Estação Virtual

Os arquivos TECMAP possuem 120 colunas referentes ao intervalo de longitudes de 90°O a 30°O, e 160 linhas referentes aos intervalos de latitudes de 60°S a 20°N. Nesse contexto, cada linha/coluna corresponde a um intervalo de 0,5 graus em ordem de latitude/longitude. Eventualmente, na ausência de *Pierce Points* para uma determinada localidade, pode-se obter o VTEC desse local a partir de uma “Estação Virtual”, caso esteja dentro dos limites geográficos representados no TECMAP.

Dessa forma, a conversão de uma determinada latitude geográfica para a linha correspondente da matriz TECMAP pode ser feita da seguinte forma:

$$Linha = 160 - \left\lfloor \frac{20 + lat}{0,5} \right\rfloor, \quad (4.7)$$

e a conversão de uma determinada longitude geográfica para a coluna correspondente da matriz TECMAP pode ser feita da seguinte forma:

$$Coluna = \left\lfloor \frac{90 + lon}{0,5} \right\rfloor. \quad (4.8)$$

Portanto, em coordenadas geográficas, uma Estação Virtual pode ser representada a partir da seguinte relação:

$$[X, Y] = [Coluna, Linha]. \quad (4.9)$$

4.3.2 Determinação do padrão diário de ionização

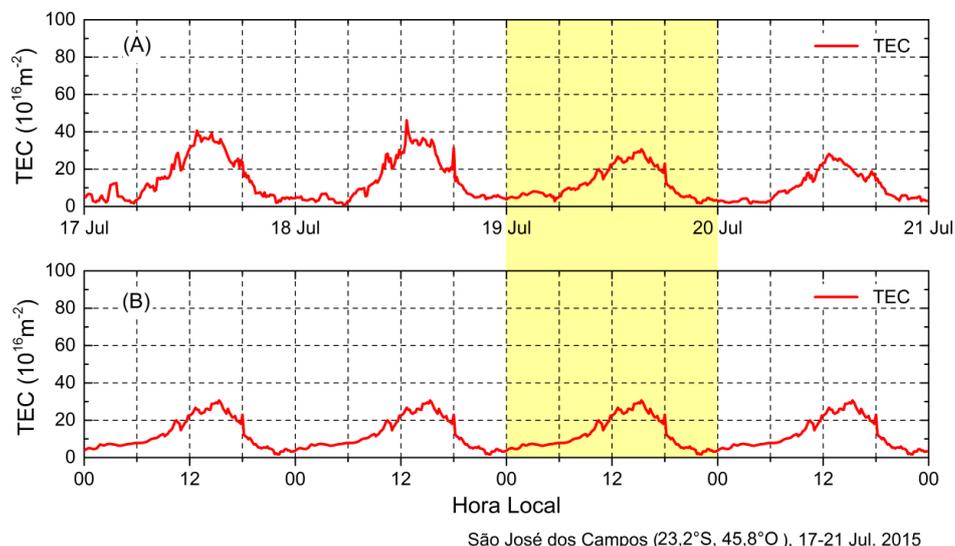
O TEC apresenta diversas variabilidades, com escalas temporais distintas, podendo ocorrer em intervalos de minutos a dias, a depender da origem. Com a finalidade de obter-se um padrão diário no qual as variações de curta duração (e.g., assinaturas de ondas de gravidade) sejam suavizadas, propõe-se um método de pré-processamento baseado na determinação de um padrão diário de variação da curva de densidade eletrônica. Adicionalmente, ressalta-se que este padrão de ionização será posteriormente utilizado no cálculo do valor calmo de referência para o novo índice. Nesse contexto, o método de determinação do padrão de ionização consiste na seleção dos dados de TEC obtidos a partir do dia geomagneticamente mais calmo do período. Em seguida, esses dados são replicados para os demais dias no intuito de determinar um padrão diário de ionização para o período de estudo. A determinação do dia mais calmo do período é feita a partir da classificação proposta pelo Centro Alemão de Pesquisas em Geociências (GFZ, do alemão *GeoForschungsZentrum*), restrita para um determinado número de dias. Esta classificação leva em consideração os valores do índice Kp, baseando-se em três critérios (GFZ, 2018):

- I. A soma dos oito valores do Kp ($\sum Kp$);
- II. A soma dos quadrados dos oito valores do Kp ($\sum Kp^2$); e
- III. O valor máximo dentre os oito valores do Kp .

Cada critério atribui um valor numérico a cada um dos dias do período, totalizando, assim, três valores para cada dia. Em seguida, é calculada a média dos três valores. Os dias com média mais baixa serão definidos como os mais calmos do período, e os dias com média mais alta serão, respectivamente, os mais perturbados. Dessa forma, assume-se que o dia mais calmo do período é capaz de quantificar os níveis máximos e mínimos de ionização da ionosfera, representando o padrão característico da variabilidade diária do TEC, com mínima influência de perturbações ionosféricas.

Na Figura 4.4, apresentam-se os elementos que integram a metodologia empregada na determinação do padrão diário de ionização. O gráfico 'A' exibe a variação dos dados de TEC obtidos a partir da Estação Virtual de São José dos Campos, durante o período de 17 a 21 de julho de 2015. O gráfico 'B' representa o respectivo padrão diário de ionização obtido para a mesma Estação Virtual, durante o mesmo período. O retângulo amarelo destaca a variação temporal do TEC durante o dia geomagneticamente mais calmo do período (19 de julho), e, conseqüentemente, o TEC selecionado para representar o padrão diário de ionização deste período de estudo.

Figura 4.4 - Variação temporal do (A) TEC da Estação Virtual de São José dos Campos, e do (B) padrão diário de ionização no período de 17 a 21 de julho de 2015. O retângulo amarelo indica o dia mais calmo do período.



Fonte: Produção do autor.

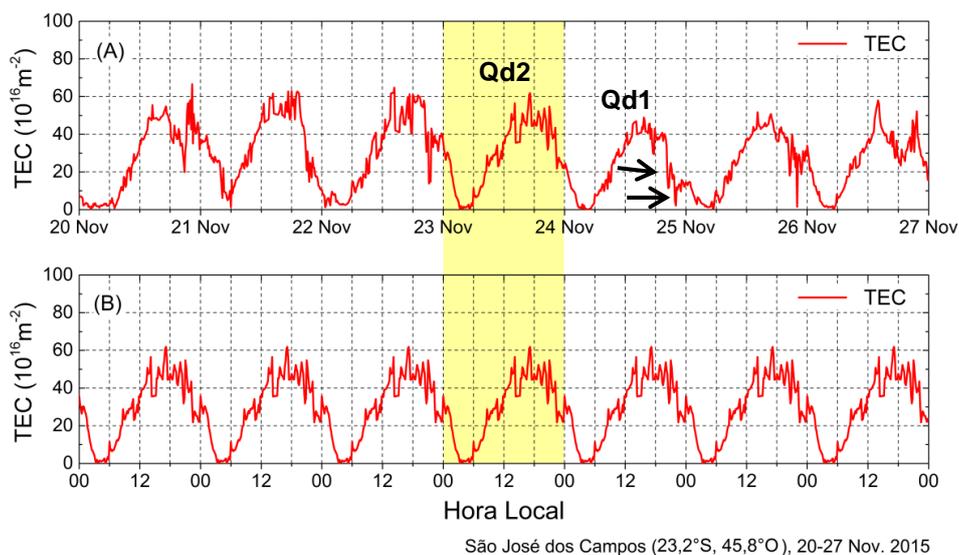
4.3.3 Exclusão de dias com ocorrência de irregularidades ionosféricas

Com o objetivo de eliminar efeitos de irregularidades no plasma ionosférico, geralmente atribuídas à ocorrência de bolhas de plasma (ABDU, 1993), propõe-se a utilização de uma técnica simples, baseada na inclusão de um parâmetro condicional no método de determinação do padrão diário de ionização. A técnica consiste em selecionar o dia mais calmo do período, porém considerando apenas os dias em que não haja depleções maiores do que 20 TECU nos valores do TEC. A confirmação da ocorrência de irregularidades ionosféricas é feita a partir da observação de espalhamento (Spread-F) em ionogramas. O fenômeno do espalhamento ocorre a partir de múltiplos desvios na trajetória da onda eletromagnética, relacionados a flutuações irregulares no índice de refração ionosférico. Ademais, a ocorrência do espalhamento na ionosfera está relacionada principalmente à ocorrência de irregularidades (depleções) no plasma, que por sua vez podem ser relacionadas a bolhas de plasma. Nesse contexto, a partir da redefinição do dia mais calmo do período, eliminando dias com ocorrência de irregularidades

ionosféricas, o padrão diário de ionização foi calculado conforme o método apresentado na Seção 4.3.2.

A Figura 4.5 ilustra os elementos que integram a metodologia empregada na eliminação de depleções relacionadas a bolhas de plasma. O gráfico 'a' exibe a variação dos dados de TEC obtidos a partir da Estação Virtual de São José dos Campos, durante o período de 20 a 27 de novembro de 2015. O gráfico 'b' representa o respectivo padrão diário de ionização obtido para a mesma Estação Virtual, durante o mesmo período, porém excluindo os dias com ocorrência de depleções maiores do que 20 TECU. Os termos Qd1 e Qd2 representam o primeiro e o segundo dia mais calmo do período, respectivamente. As setas indicam a ocorrência de depleções com amplitude maior do que 20 TECU, apontando a presença de possíveis bolhas de plasma durante o Qd1 (24 de novembro), o que o torna inapto à representação do padrão diário de ionização. O retângulo amarelo destaca a variação temporal do TEC durante o dia geomagneticamente mais calmo do período sem a ocorrência de depleções significativas, sendo este o selecionado para representar o padrão diário de ionização neste período de estudo.

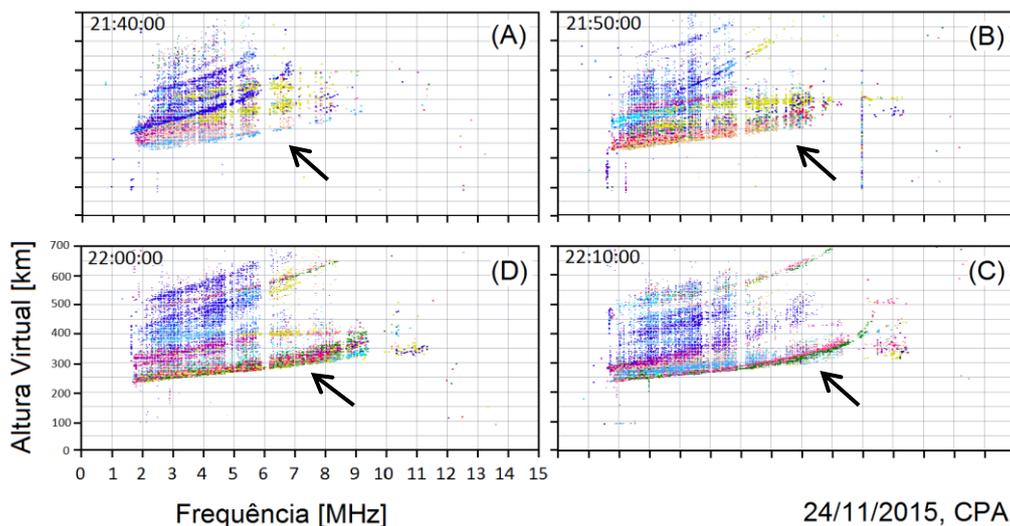
Figura 4.5 - Variação temporal do (a) TEC da Estação Virtual de São José dos Campos, e do (b) padrão diário de ionização no período de 20 a 27 de novembro de 2015. As setas indicam depleções maiores do que 20 TECU durante o dia geomagneticamente mais calmo do período.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.6 apresenta uma sequência de quatro ionogramas obtidos por meio de uma ionossonda localizada no município de Cachoeira Paulista (22.4°S, 44.5°O), no intervalo entre 21:40h LT e 22:10h LT do dia 24 de novembro de 2015. O eixo vertical representa as alturas virtuais de reflexão das camadas ionosféricas, e o eixo horizontal representa as frequências de reflexão do sinal. As setas indicam a ocorrência de Spread-F (espalhamento), classificando o dia 24 de novembro como inapto a representar o padrão diário de ionização.

Figura 4.6 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos entre 21:40h LT e 22:10h LT do dia 24 de novembro de 2015. As setas indicam a evolução temporal da ocorrência do Spread-F.



Fonte: Produção do autor.

Com base nesta figura, observa-se que às (A) 21:40h LT o sinal transmitido começa a sofrer espalhamento. Em seguida, verifica-se uma intensificação gradativa neste processo, como pode-se observar nos ionogramas de (B) 21:50h LT, (C) 22:00h LT e (D) 22:10h LT. Ressalta-se que o fenômeno Spread-F relaciona-se principalmente à ocorrência de irregularidades no plasma (ABDU, 1994), o que confirma a hipótese da inaptidão do dia 24 de novembro à representação do padrão diário de ionização.

4.4 Modificações na determinação do valor calmo de referência

Nesta seção, dois diferentes métodos para a determinação do valor calmo de referência são propostos: a Média Móvel Centrada (MMC) do padrão diário de ionização e os dados de TEC do modelo de Referência Internacional da Ionosfera (IRI, do inglês *International Reference Ionosphere*). Os métodos foram analisados com o objetivo de definir o mais apropriado para o cálculo do novo índice. Nesse contexto, foram efetuadas análises estatísticas comparativas entre os métodos, utilizando diferentes resoluções temporais (para o caso das MMCs), durante diferentes épocas do ano. Adicionalmente, considerou-se também o método proposto por Jakowski et al. (2006), que consiste em uma média mensal dos dados TEC.

- **Média Móvel Centrada (MMC):**

O valor calmo de referência, TEC_i^{Qd} , pode ser calculado utilizando a MMC a partir da seguinte equação:

$$TEC_i^{Qd} = \frac{1}{2q + 1} \sum_{r=-q}^{+q} TEC_{i+r}, \quad (4.10)$$

na qual TEC_i é o valor do TEC em um determinado horário, r é o intervalo inferior da escala de resolução temporal da média móvel, e q é o ponto que deve delimitar os intervalos da escala de amostragem para que o valor de TEC_i^{Qd} obtido tenha posição equivalente ao centro do intervalo de TEC_i .

O valor de q é dado por:

$$q = \begin{cases} (N - 1)/2, & \text{se } N \text{ for ímpar} \\ (N/2) - 1, & \text{se } N \text{ for par} \end{cases}, \quad (4.11)$$

na qual N é o número de pontos contidos na resolução temporal para a qual é calculada a MMC.

- **O modelo IRI**

O IRI é um modelo de cálculo de parâmetros ionosféricos, desenvolvido em conjunto pelo Comitê de Pesquisa Espacial (COSPAR, do inglês *Committee on Space Research*) e pela União Radiocientífica Internacional (URSI, do francês *Union Radio-Scientifique Internationale*) (BILITZA, 2001), sendo amplamente utilizado no estudo de variáveis ionosféricas, tais como densidade eletrônica e temperatura (ODRIOZOLA, 2017; ASEVEDO-JUNIOR, 2009; MORO, 2015)

O segundo método proposto para a determinação do valor calmo de referência consiste na utilização dos dados de TEC gerados a partir do modelo IRI para a mesma localização da Estação Virtual. Esta metodologia representa uma tentativa de caracterizar o comportamento típico da curva de TEC sob condições geomagneticamente calmas, para um determinado período. Neste contexto, o valor calmo de referência, TEC_i^{Qd} , é definido a partir da seguinte relação:

$$TEC_i^{Qd} = TEC_i^{IRI}, \quad (4.12)$$

na qual TEC_i^{IRI} representa o TEC obtido do modelo IRI, para um determinado horário (índice i).

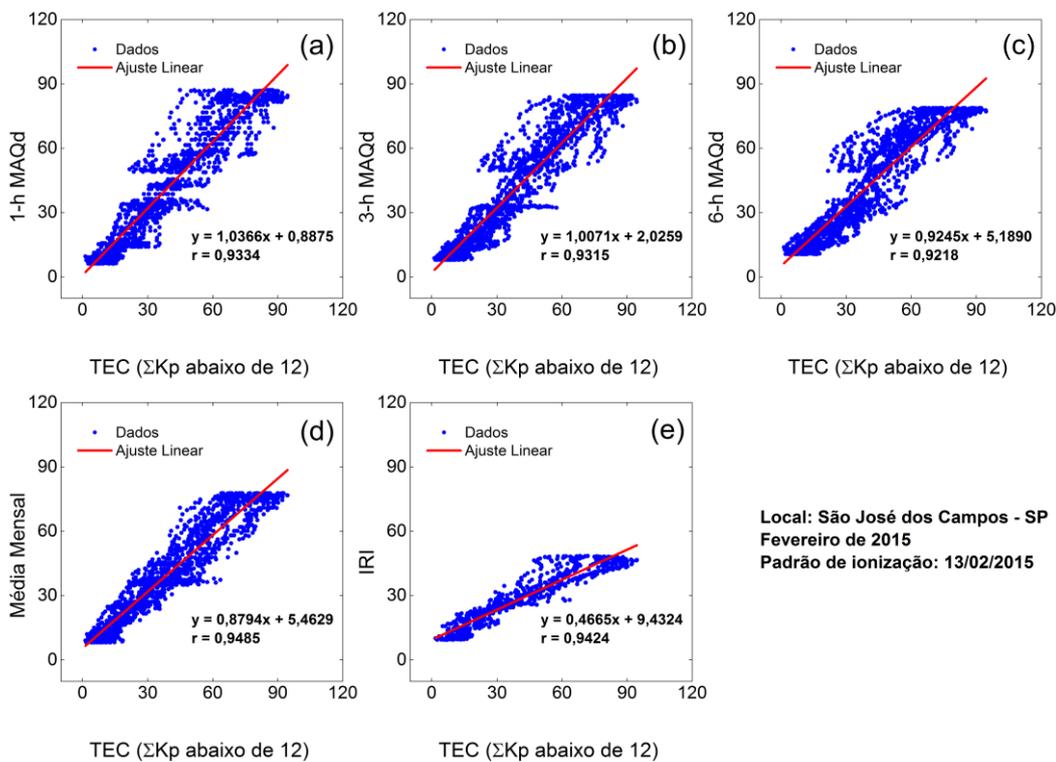
Com o intuito de definir o método mais adequado à determinação do valor calmo de referência para o novo índice, foram calculados os valores de referência para três períodos geomagneticamente calmos, abrangendo os meses de fevereiro, junho e novembro de 2015, utilizando a seguinte metodologia:

- MMCs do padrão diário de ionização do período, com resoluções temporais de 1h (método 1-hMAQd) , 3h (método 3-hMAQd) e 6h (método 6-hMAQd);
- Média mensal dos dados de TEC (método original); e
- Dados de TEC do modelo IRI.

Para avaliar os métodos, foram selecionados 10 dias com $\sum Kp$ (somatório do índice Kp) abaixo de 12, no âmbito do mês relacionado ao período de estudo. Nesse contexto, os valores de TEC obtidos para esses dias foram comparados com o TEC de referência derivado de cada método. Dessa forma, assumiu-se que a similaridade estatística entre as séries de dados deve ser válida para definir se o método pode ou não representar a curva de densidade eletrônica de um dia geomagneticamente calmo, dentro de um determinado período de abrangência.

Na Figura 4.7, apresentam-se os gráficos de dispersão entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos e cada um dos valores de referência, calculados a partir das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, da (d) média mensal do TEC e do (e) modelo IRI, durante o mês de fevereiro de 2015.

Figura 4.7 - Gráficos de dispersão e ajuste linear entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos do mês de fevereiro e o TEC de referência derivado das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, juntamente com a (d) média mensal do TEC e o (e) TEC do modelo IRI.

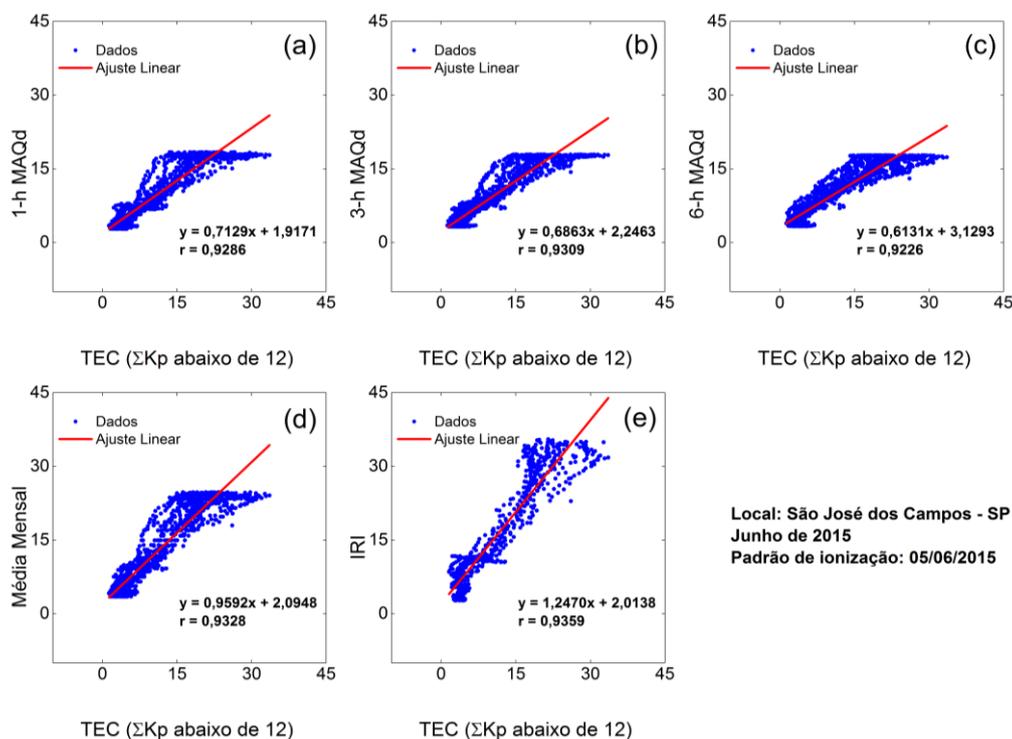


Fonte: Produção do autor.

Com base nesta análise, verificou-se correlação muito forte ($r > 0,9$) em todos os casos. No entanto, observou-se que, dentre os métodos, aqueles que apresentam retas de regressão mais próximas do comportamento ideal, com coeficiente angular próximo de 1 e coeficiente linear próximo de 0, são os métodos de MMC com resolução temporal de 1 hora e 3 horas, respectivamente. A MMC com resolução temporal de 6 horas apresentou coeficiente angular próximo de 1. No entanto, sua reta de regressão interceptou a curva em $y = 5,1890$. Esta característica pode ocasionar a inserção de ruídos de alta amplitude no cálculo do novo índice. O método da média mensal apresentou coeficiente angular próximo de 1. Contudo, o seu coeficiente linear apresentou valor alto, assim como na MMC de 6 horas. Finalmente, o modelo IRI apresentou dispersão elevada com relação aos dias calmos, fazendo com que os dados do modelo IRI sejam insuficientes para representar o valor calmo de referência do índice ionosférico.

Na Figura 4.8, apresentam-se os gráficos de dispersão entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos e cada um dos valores de referência, calculados a partir das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, da (d) média mensal do TEC e do (e) modelo IRI, durante o mês de junho de 2015.

Figura 4.8 - Gráficos de dispersão e ajuste linear entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos do mês de junho e o TEC de referência derivado das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, juntamente com a (d) média mensal do TEC e o (e) TEC do modelo IRI.

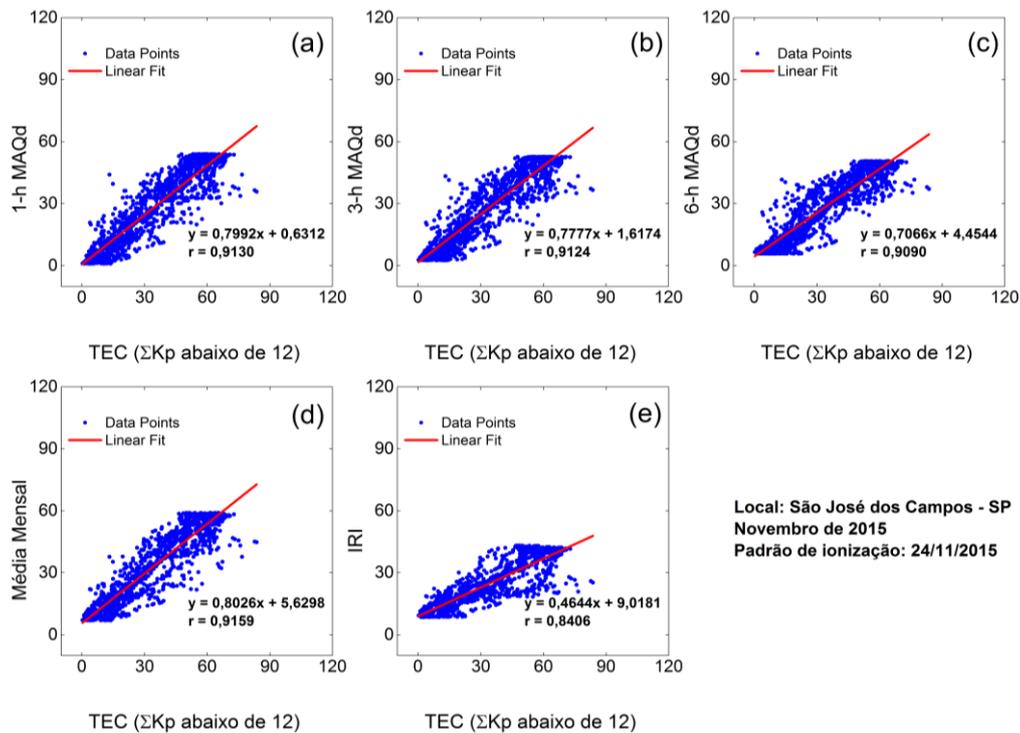


Fonte: Produção do autor.

De acordo com esta análise, verificou-se correlação muito forte ($r > 0,9$) em todos os casos. Observou-se que, dentre os métodos apresentados, aqueles que possuem retas de regressão mais próximas do comportamento ideal são os métodos de MMC de 1 hora e de média mensal, respectivamente. Adicionalmente, as MMCs de 3h e 6h apresentaram coeficientes angulares iguais a 0,6863 e 0,6131, respectivamente. Finalmente, o modelo IRI apresentou coeficiente angular alto (1,4970), e por este motivo foi descartado para este período.

Na Figura 4.9, apresentam-se os gráficos de dispersão entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos e cada um dos valores de referência, calculados a partir das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, da (d) média mensal do TEC e do (e) modelo IRI, durante o mês de novembro de 2015.

Figura 4.9 - Gráficos de dispersão e ajuste linear entre os dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos do mês de novembro e o TEC de referência derivado das MMCs de (a) 1h, (b) 3h e (c) 6h, juntamente com a (d) média mensal do TEC e o (e) TEC do modelo IRI.



Fonte: Produção do autor.

Nesta análise, verificou-se correlação muito forte ($r > 0,9$) em todos os casos, com exceção aos dados do modelo IRI. No entanto, observou-se que, dentre os métodos apresentados, aqueles que apresentam retas de regressão mais próximas do comportamento ideal são os métodos de MMC de 1 hora e 3 horas, respectivamente. Adicionalmente, a MMC de 6 horas e a média mensal apresentaram coeficientes angulares próximos de 1. No entanto, suas retas de regressão interceptam o eixo y em 4,4544 e 5,6298, respectivamente. Esta característica pode representar a inserção de ruídos de alta amplitude no cálculo do índice ionosférico. Finalmente, o modelo IRI apresentou coeficiente angular baixo (0,4644) e coeficiente linear igual a 9,0181. Por este motivo, este método foi considerado inapto a representar o valor calmo de referência do índice ionosférico.

Com relação às análises dos métodos de determinação do valor calmo de referência para o índice, observaram-se as características listadas abaixo:

- Os dados de TEC do modelo IRI foram descartados, pois apresentaram alta dispersão com relação aos dados de TEC dos 10 dias geomagneticamente calmos.
- O método da MMC de 6 horas apresentou grandes diferenças de amplitudes com relação aos dados observados, o que pode ocasionar a inserção de ruídos no índice ionosférico. Por este motivo, este método foi descartado.
- Os métodos da MMC de 1h e 3h, assim como a média mensal, apresentaram bom ajuste linear e forte correlação com os dados de TEC obtidos durante os dias geomagneticamente calmos. Por este motivo, estes métodos foram considerados aptos a representar o valor calmo de referência para o índice ionosférico.

Contudo, ressalta-se que a média mensal dos dados de TEC pode incluir tanto dias geomagneticamente calmos, como dias com tempestades geomagnéticas extremas. Dessa forma, optou-se por selecionar um dos métodos de Média Móvel Centrada para a determinação do valor calmo de referência para o índice ionosférico. Nesse contexto, tendo em vista a suavização de perturbações ionosféricas de curta escala temporal (e.g. ondas de gravidade, TIDs), bem como a atenuação de ruídos, a Média Móvel Centrada com resolução temporal de 3 horas (3-hMAQd) foi o método selecionado para a determinação do valor calmo de referência para o novo índice.

4.5 Modificações na equação do DIX: introduzindo o LDIX

Para melhor observar a amplitude e a dinâmica das perturbações ionosféricas, propõem-se algumas modificações na equação do DIX (vide Equação 4.2). Tais modificações, juntamente com a nova metodologia de cálculo do valor calmo de referência, caracterizam o desenvolvimento do novo índice

ionosférico, aqui denominado ‘índice local de perturbações ionosféricas’ (LDIX, do inglês *Local Disturbance Ionosphere index*).

As modificações propostas na equação do DIX incluem a inserção de três novos termos: o termo ΔTEC , o termo k e o termo j :

- Levando em consideração a equação original do DIX, os valores obtidos representam dados de variação percentual do TEC com relação ao valor calmo de referência. Esta característica faz com que os valores noturnos do DIX sejam superestimados, pois as perturbações noturnas apresentam maior amplitude relativa, em comparação aos valores diurnos. O termo ΔTEC proposto é calculado por meio da diferença absoluta entre o TEC mensurado e o valor calmo de referência, sendo capaz de proporcionar uma melhor visualização das perturbações ionosféricas de caráter diurno com relação à sua amplitude. Este termo é obtido a partir da seguinte relação:

$$\Delta TEC_i = |TEC_i - TEC_i^{Qd}|. \quad (4.13)$$

- O termo k , dado em TECU, representa um parâmetro de ajuste de amplitudes, e é definido com o intuito de nivelar a proporção do termo da variação percentual com a do termo ΔTEC . O termo k representa a medida das 00:00h LT obtida a partir do valor calmo de referência, representado por TEC_i^{Qd} . Conseqüentemente, o termo k também corresponde à razão entre o valor às 00:00h LT do termo ΔTEC e o valor do termo de variação percentual para o mesmo horário. Desta forma, assume-se que os valores noturnos do termo de variação percentual são coerentes, podendo representar as amplitudes de referência para as variações obtidas utilizando-se o índice LDIX. Finalmente, ressalta-se que o termo k é importante, pois dá dimensionamento adequado à equação e nivela as amplitudes do LDIX.
- O termo j , também dado em TECU, é um termo de normalização de escala de perturbações com relação a estados ionosféricos. Este termo

é definido a partir da análise da amplitude do pico máximo observado no LDIX durante uma tempestade geomagnética extrema (e.g. Tempestade Geomagnética do dia de St. Patrick), com o intuito de atribuir ao índice um valor máximo perturbado em uma escala de 0 a 5.

Assim, o LDIX é definido a partir da seguinte equação:

$$LDIX = \sqrt{\left(\frac{k|(TEC_i - TEC_i^{Qd})/TEC_i^{Qd}| + \Delta TEC_i}{j}\right)^2}. \quad (4.14)$$

O termo $|(TEC_i - TEC_i^{Qd})/TEC_i^{Qd}|$ foi obtido a partir da equação original do DIX, e representa a variação percentual do TEC com relação ao valor calmo de referência. Assumindo que os valores noturnos do termo de variação percentual sejam coerentes, efetua-se o nivelamento desses valores com os do termo ΔTEC . Este procedimento tem como objetivo tornar o índice sensível às perturbações ionosféricas de ambos os períodos, diurno e noturno. Após isso, é feito o ajuste de escala, para que o índice LDIX possa apresentar valores em um intervalo de 0 a 5. Ressalta-se que o LDIX possui caráter adimensional.

A Tabela 4.1 apresenta uma classificação prévia dos estados da ionosfera de acordo com o grau de perturbação determinado pelo LDIX.

Tabela 4.1 - Tabela de estados ionosféricos de acordo com os valores observados no índice LDIX.

Faixa de variação do LDIX	Estado da ionosfera
0 – 1	Calma
1 – 2	Perturbação leve
2 – 4	Perturbação moderada
4 – 5	Perturbação intensa

Fonte: Produção do autor.

O coeficiente j é fixo no tempo, e para uma determinada posição geográfica. Para o caso de São José dos Campos, o termo j foi calculado durante a tempestade geomagnética do dia de St. Patrick (17 de março de 2015). Esta tempestade é classificada como extrema, e os seus efeitos foram observados na ionosfera em uma larga faixa de latitudes (MAURYA et al., 2018). Nesse contexto, para a Estação Virtual de São José dos Campos, atribuiu-se o valor $j = 29,614$ TECU. Dessa forma, quando a soma dos termos superiores da Equação 4.14 for igual a 148,07 TECU, o valor do LDIX será igual a 5, representando perturbações intensas na ionosfera de acordo com as informações apresentadas na Tabela 4.1.

Os valores do coeficiente k são variáveis no tempo, e para diferentes posições geográficas, pois são afetados diretamente pela sazonalidade do TEC. Para o caso de São José dos Campos, o termo k foi calculado para 5 períodos geomagneticamente calmos e para 5 períodos geomagneticamente perturbados durante o ano de 2015, levando em consideração a disponibilidade de dados e a ocorrência de eventos ionosféricos amplamente estudados na literatura científica.

Períodos geomagneticamente calmos:

- 12 a 17 de fevereiro de 2015;
- 24 de abril a 01 de maio de 2015;
- 02 a 07 de junho de 2015;
- 24 de setembro a 01 de outubro de 2015; e
- 20 a 27 de novembro de 2015.

Períodos geomagneticamente perturbados:

- 07 a 17 de janeiro de 2015;
- 14 a 27 de março de 2015;
- 20 a 29 de junho de 2015;
- 05 a 13 de outubro de 2015; e
- 19 a 27 de dezembro de 2015.

A Tabela 4.2 apresenta os valores do coeficiente k para a Estação Virtual de São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente calmos do ano de 2015.

Tabela 4.2 - Valores do coeficiente k para São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente calmos do ano de 2015.

Mês	Coeficiente k (TECU)
Fevereiro	32,2188
Abril	48,7302
Junho	7,2395
Setembro	29,3537
Novembro	48,6760

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 4.3 apresenta os valores do coeficiente k para a Estação Virtual de São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente perturbados do ano de 2015.

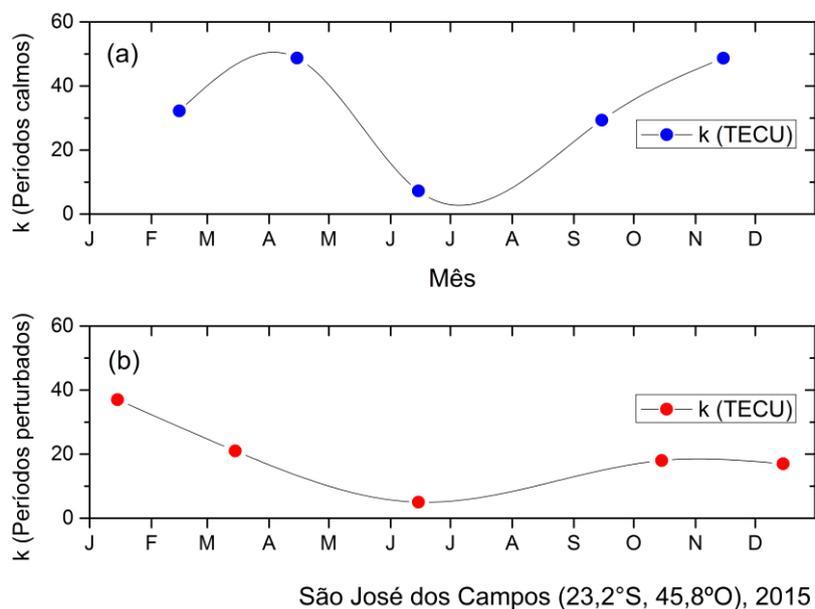
Tabela 4.3 - Valores do coeficiente k para São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente perturbados do ano de 2015.

Mês	Coeficiente k (TECU)
Janeiro	37,2983
Março	21,6252
Junho	5,0315
Outubro	18,2267
Dezembro	17,7537

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.10 apresenta os gráficos de variação temporal do coeficiente k para a Estação Virtual de São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente (gráfico 'a') calmos e (gráfico 'b') perturbados do ano de 2015.

Figura 4.10 - Gráficos de variação temporal do coeficiente k para a Estação Virtual de São José dos Campos, obtidos durante os períodos geomagneticamente (gráfico 'a') calmos e (gráfico 'b') perturbados do ano de 2015.



Fonte: Produção do autor.

Com relação aos gráficos e dados apresentados na Figura 4.10 e nas Tabelas 4.2 e 4.3, observa-se que as variações sazonais, de fato, influenciam o cálculo do termo k , visto que este apresenta comportamento condizente com as variações observadas durante os meses de inverno e verão, bem como a anomalia semianual (vide Seção 2.2.2). Adicionalmente, observa-se que em períodos geomagneticamente perturbados, o termo k tende a ser menor. Considerando que o termo k representa o valor da meia-noite local do método 3-hMAQd, observa-se que o LDIX pode ser influenciado pela sazonalidade quando calculado durante períodos muito longos a partir do mesmo valor de referência.

Nesse contexto, fixou-se um número máximo de 15 dias para o qual o índice LDIX pode ser calculado baseando-se no mesmo valor calmo de referência. Para períodos maiores do que 15 dias, um novo valor calmo de referência deve ser obtido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES: CÁLCULO DO LDIX DURANTE PERÍODOS CALMOS E PERTURBADOS

Conforme discutido no Capítulo 2, o TEC apresenta variações que podem estar associadas a fontes internas (e.g. dinâmica local, ondas/ventos/marés, bolhas ionosféricas) e/ou externas (e.g. campos elétricos de penetração, perturbações geomagnéticas) à ionosfera. Essas variações provocam mudanças no comportamento local da ionosfera, podendo afetar o desempenho de sistemas de telecomunicação e posicionamento.

Neste capítulo, estas variações no comportamento local da ionosfera serão apresentadas e discutidas em termos das respostas observadas no índice LDIX durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados. Para isso, utilizou-se como área de estudo a extensão da ionosfera situada sobre a Estação Virtual de São José dos Campos (SP), que neste trabalho será denominada SJK. Os resultados serão apresentados com base em uma análise comparativa entre os índices LDIX e DIX, tendo como referência as variações observadas no TEC com relação ao valor calmo de referência associado ao período estudado. Também serão apresentados os valores dos índices geomagnéticos Kp e Dst, com o intuito de classificar as perturbações ionosféricas observadas no LDIX de acordo com sua origem, sendo ela interna ou externa. Em todos os casos, o LDIX e o DIX foram calculados conforme os processos descritos no Capítulo 4.

5.1 Cálculo do LDIX durante períodos geomagneticamente calmos

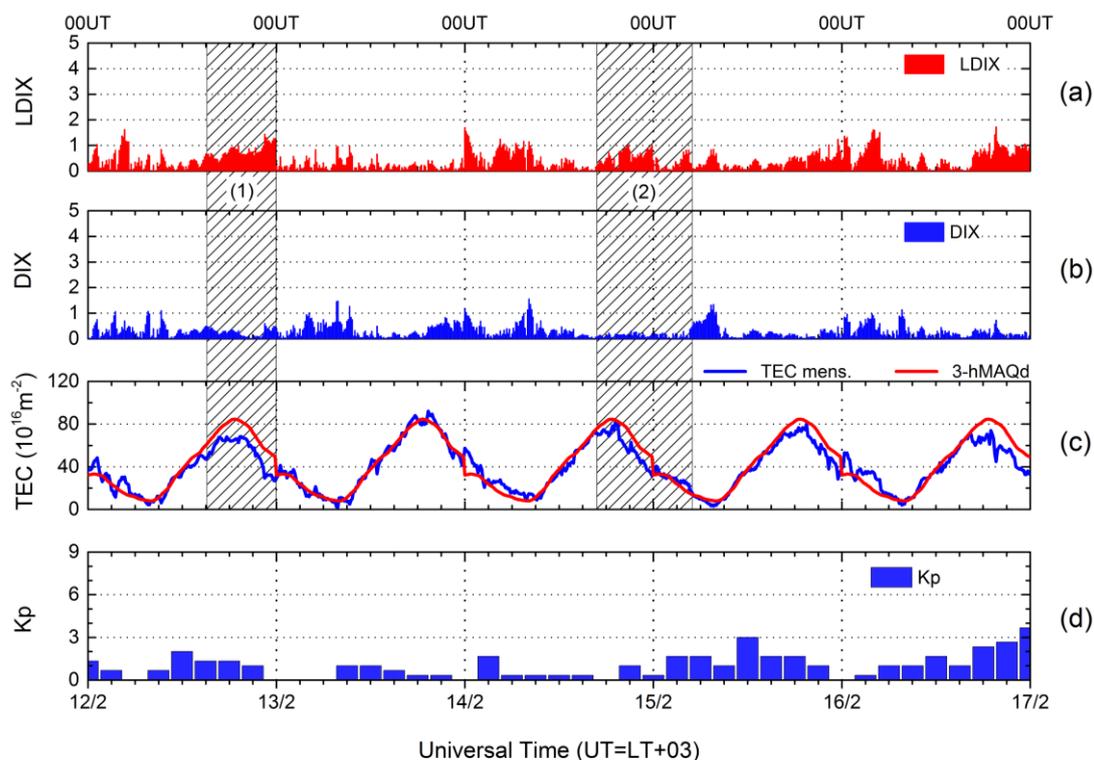
Esta seção aborda o comportamento do índice LDIX durante os períodos geomagneticamente calmos listados na Seção 4.6. Para determinar o grau de variação local da ionosfera sobre SJK durante períodos geomagneticamente calmos, foram obtidos os gráficos dos índices LDIX e DIX para 5 períodos específicos do ano de 2015. Estes, foram previamente selecionados de acordo com a classificação de Wrenn et al. (1987) para o índice Kp, a partir da qual os dias com Kp abaixo do valor 3+ são considerados geomagneticamente calmos (ou não-perturbados). Com a exclusão dos efeitos das perturbações

geomagnéticas no cálculo do LDIX, buscou-se evidenciar os efeitos das variações características da ionosfera relacionadas a fontes internas (e.g. dinâmica local, ondas/ventos/marés, bolhas ionosféricas).

5.1.1 Período de 12 a 17 de fevereiro de 2015

A Figura 5.1 apresenta o primeiro resultado deste estudo. Nesta figura, verifica-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 12 a 17 de fevereiro de 2015, para a Estação Virtual SJK (gráfico identificado pela letra a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do DIX, (c) do TEC e seu referencial calmo, bem como (d) os valores do índice Kp para o mesmo período.

Figura 5.1 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 12 a 17 de fevereiro de 2015.



São José dos Campos (23,2°S, 45,8°O), 12-17 Feb. 2015

Fonte: Produção do autor.

Ao longo deste período de estudo, os valores do índice Kp mantiveram-se abaixo de 3 durante a maior parte do período, atingindo um valor máximo de Kp = 3+ durante as últimas horas do dia 16 de fevereiro. Adicionalmente, pela variação do índice Kp observada nesta figura, verifica-se que o dia mais calmo do período é representado pelo dia 13 de fevereiro. Diante desta condição geomagneticamente calma, os dados de TEC para a Estação Virtual SJK apresentaram variações da ordem de 8-20 TECU durante todo período, portanto, sem variações de grande amplitude.

Com relação à evolução de curta escala temporal (período entre alguns minutos e algumas horas) do TEC neste período, observam-se variações positivas e negativas. Associadas a essas variações, o LDIX atinge valores próximos de 1 (ionosfera calma) e 2 (perturbação leve). Neste caso, o DIX apresentou comportamento similar. No entanto, observou-se que as variações ionosféricas de caráter diurno tendem a ser atenuadas no DIX. Isso pode ser observado no dia 12 de fevereiro, quando surgem variações no TEC da ordem de 20 TECU. Ressalta-se, contudo, que o valor do DIX permanece abaixo de 1 (área hachurada 1) neste exemplo. Outro exemplo nesta linha de raciocínio ocorre entre os dias 14 e 15 de fevereiro (área hachurada 2). Nesse intervalo, o LDIX indica perturbações leves, enquanto o DIX permanece com valores próximos de zero.

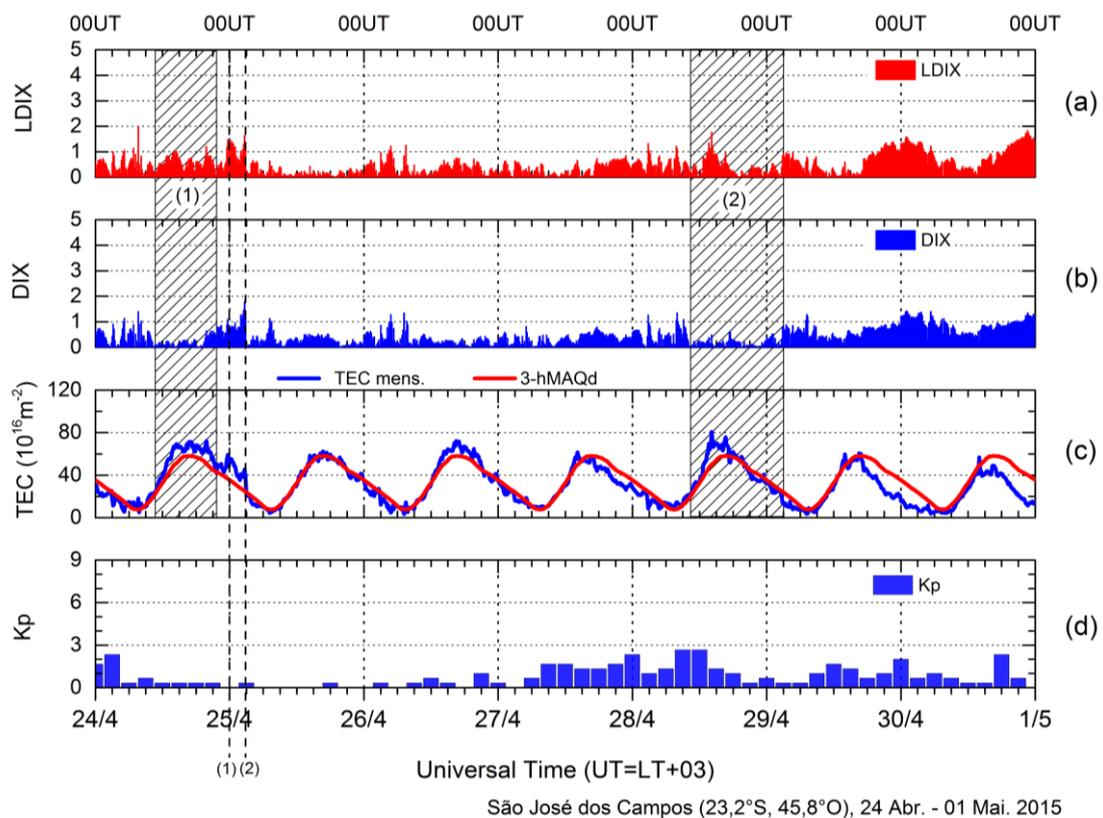
Posteriormente, considerando os valores calmos de referência calculados para este período, verificou-se a inserção de ruído nos valores de TEC próximos de 00:00h UT. Isto ocorre em decorrência dos efeitos de borda característicos do processo de utilização das médias móveis. O resultado deste processo é a ocorrência de pequenas intensificações nas perturbações observadas no LDIX durante períodos limítrofes (bordas da série temporal), como pode ser observado nos valores do LDIX e TEC às 00:00h UT do dia 14 de fevereiro (gráficos 'a' e 'c'). No entanto, ressalta-se que esses efeitos podem ser atenuados a partir da extrapolação dos limites do valor calmo de referência em um intervalo de 3 horas com relação aos período anterior e posterior ao dia geomagneticamente mais calmo do período.

Finalmente, com base nesta análise, verificou-se que o índice LDIX e o índice DIX apresentaram discrepâncias pontuais (vide áreas hachuradas) na ausência de variações ionosféricas de grande amplitude.

5.1.2 Período de 24 de abril a 01 de maio de 2015

Na Figura 5.2, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 24 de abril a 01 de maio de 2015, para a Estação Virtual SJK (gráfico identificado pela letra a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentadas as variações temporais (b) do índice DIX, (c) do TEC e seu referencial calmo, assim como (d) os valores do índice Kp para o mesmo período.

Figura 5.2 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 24 de abril a 01 de maio de 2015.



Fonte: Produção do autor.

Ao longo deste período de estudo, o índice Kp se manteve abaixo de 3 durante todo os dias. Dessa forma, pela variação do Kp observada nesta figura, observa-se que o dia geomagneticamente mais calmo do período é representado pelo dia 25 de abril. Diante desta condição geomagneticamente calma, verifica-se a ocorrência de dois picos no TEC entre os dias 24 e 25, das 23:00h UT às 03:00h UT (linhas 1 e 2 da figura). A ocorrência desses aumentos pode ser explicada pelo mecanismo descrito em Abdu (2005), que afirma que devido à intensificação do campo elétrico zonal para leste, o transporte do plasma impulsinado pelo efeito fonte também é intensificado, fazendo com que o plasma das cristas da EIA seja deslocado para latitudes mais altas. Esse processo tende a provocar um aumento na densidade do plasma ionosférico dessas regiões. Portanto, a assinatura da EIA em latitudes maiores, juntamente com os efeitos do pico pré-reversão (PRE, do inglês *prereversal enhancement*) podem ser atribuídos aos picos observados na curva do TEC entre os dias 24 e 25.

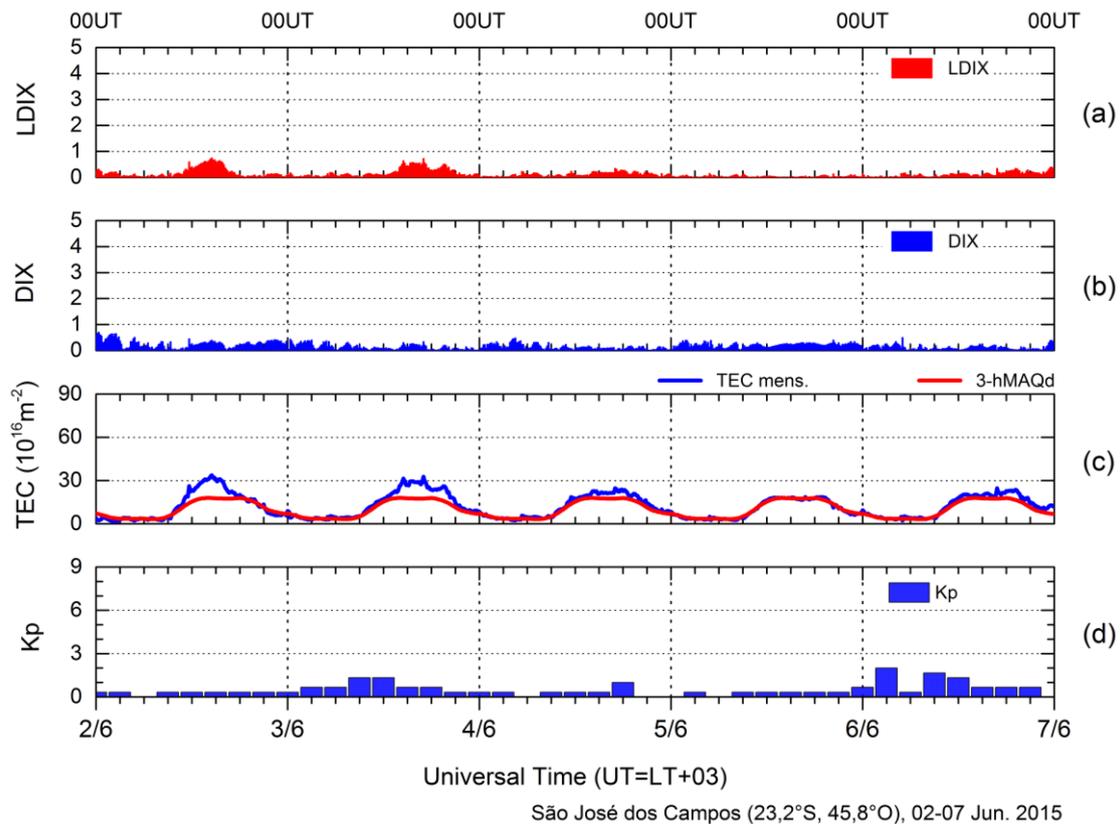
Adicionalmente, observa-se na Figura 5.2 que nos dias 29 e 30, variações no TEC da ordem de 20-30 TECU, com relação ao valor calmo de referência, fizeram com que o LDIX apresentasse valores próximos de 1 (perturbação leve) e 2 (perturbação moderada). No caso deste período de estudo, observou-se que o DIX apresentou comportamento similar ao LDIX. No entanto, ressalta-se que as variações ionosféricas de caráter diurno tendem a ser atenuadas no índice DIX. Este comportamento pode ser constatado observando as áreas hachuradas 1 e 2 da figura, que destacam variações no LDIX que não são detectadas adequadamente pelo DIX.

Com base nesta análise, verificou-se que os índices LDIX e DIX apresentaram comportamento similar durante o período geomagneticamente calmo de 24 de abril a 01 de maio de 2015. No entanto, observou-se que o índice DIX apresentou limitações quanto à detecção de variações ionosféricas de caráter diurno.

5.1.3 Período de 02 a 07 de junho de 2015

Na Figura 5.3, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 02 a 07 de junho de 2015, para a Estação Virtual SJK (gráfico identificado pela letra a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do índice DIX, (c) do TEC e seu referencial calmo, bem como (d) os valores do índice Kp para o mesmo período.

Figura 5.3 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 02 a 07 de junho de 2015.



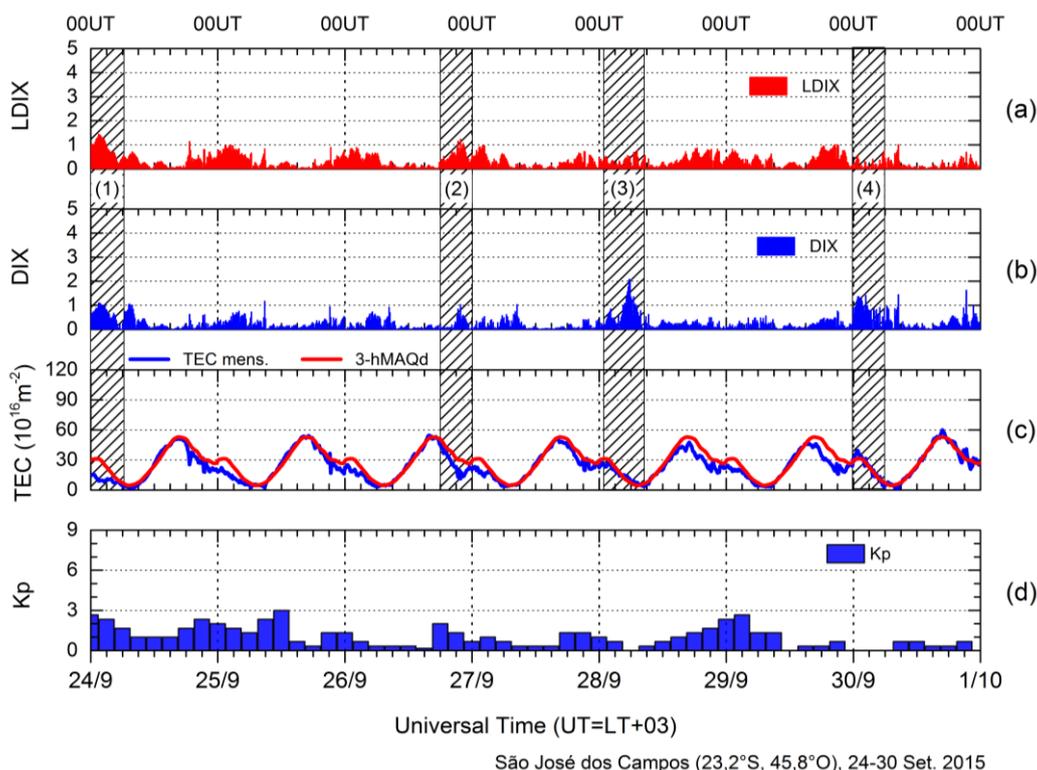
Fonte: Produção do autor.

Ao longo do período de 02 a 07 de junho de 2015, os valores do índice Kp mantiveram-se baixos, apresentando um valor máximo de $K_p = 3$ durante o início do dia 05 de junho. Adicionalmente, em função da variação do índice Kp observada nesta figura, verifica-se que o dia mais calmo do período é representado pelo dia 05 de junho. Diante desta condição geomagneticamente calma, os dados de TEC para a Estação Virtual SJK apresentaram poucas variações. Como pode-se observar na figura, o valor máximo diário do TEC se manteve próximo de 30 TECU durante os dias 02 e 03, e próximo de 20 TECU nos dias 04, 05 e 06. Ainda nesse contexto, observam-se pequenas variações na curva de TEC da ordem de 10-12 TECU com relação ao referencial calmo, durante os dias 02 e 03 de junho. No entanto, ressalta-se que tais variações não atribuíram valores altos ao índice LDIX, que se manteve abaixo de 1 durante todo o tempo.

5.1.4 Período de 24 de setembro a 01 de outubro de 2015

Na Figura 5.4, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 24 de setembro a 01 de outubro de 2015, para a Estação Virtual de São José dos Campos (gráfico representado pela letra a). Ainda nesta figura, são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do índice DIX, (c) do TEC e seu referencial calmo, bem como (d) os valores do índice Kp para o mesmo período.

Figura 5.4 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 24 de setembro a 01 de outubro de 2015.



Fonte: Produção do autor.

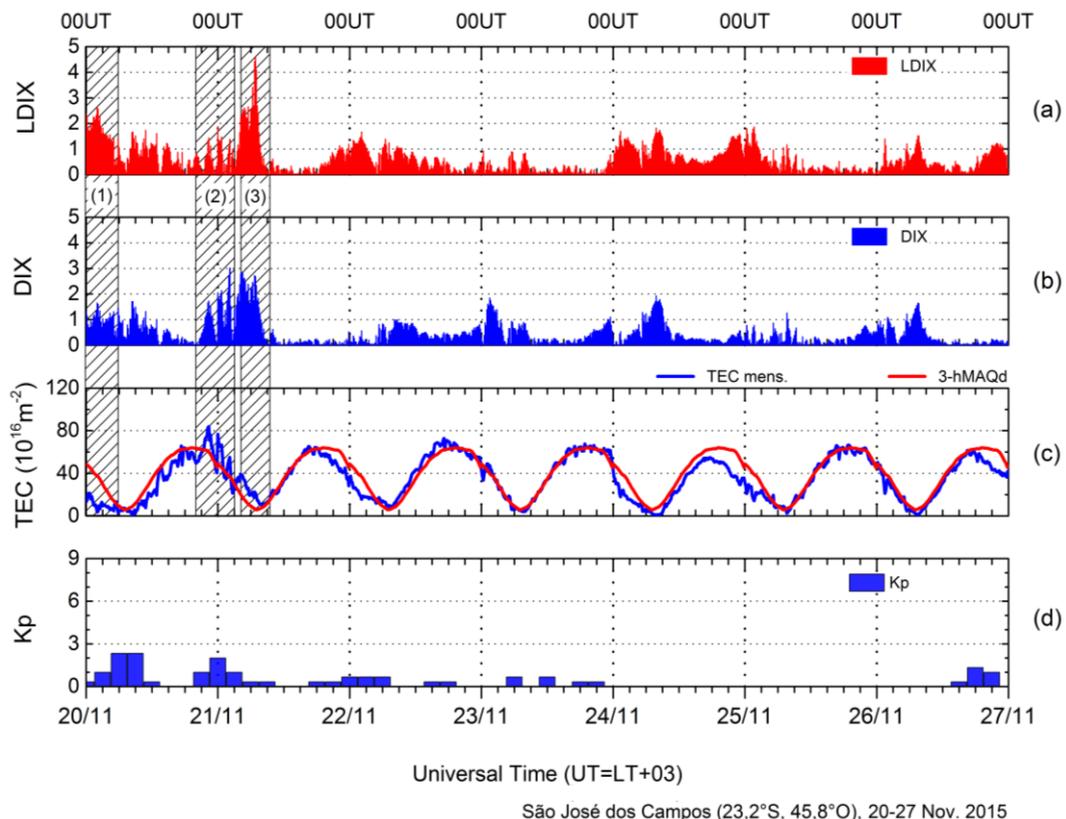
Ao longo do período de 24 de setembro a 01 de outubro de 2015, os valores do índice Kp mantiveram-se baixos, apresentando um valor máximo de $Kp = 3$ durante o dia 25 de setembro. Adicionalmente, devido à variação temporal do índice Kp observada na Figura 5.4, verifica-se que o dia geomagneticamente mais calmo do período é representado pelo dia 30 de setembro. Diante desta condição geomagneticamente calma, observam-se variações da ordem de 10-20 TECU no TEC, com relação ao valor calmo de referência, durante todo o período de estudo. Nesse contexto, o índice LDIX apresenta variações de escala 1 (perturbações leves) apenas durante os dias 24 (área hachurada 1) e 26 (área hachurada 2). Para este período de estudo, ressalta-se que os índices LDIX e DIX se comportaram de forma similar, porém observam-se aumentos no DIX durante os dias 28 (área hachurada 3) e 30 (área hachurada 4) que não são observados no LDIX, apontando variações inexistentes no TEC para a Estação Virtual SJK.

Com base nesta análise, verificou-se que o índice DIX apresentou discrepâncias com relação ao LDIX (vide áreas hachuradas 3 e 4), indicando variações inexistentes no TEC. Essas variações foram definidas como falsos positivos.

5.1.5 Período de 20 a 27 de novembro de 2015

Na Figura 5.5, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de estudo de 20 a 27 de novembro de 2015, para a Estação Virtual SJK (gráfico representado pela letra a). Ainda nesta figura, são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do índice DIX, (c) do TEC e seu valor calmo de referência, bem como (d) os valores do índice Kp para o mesmo período de estudo.

Figura 5.5 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu referencial calmo, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 20 a 27 de novembro de 2015.



Fonte: Produção do autor.

Ao longo do período de 20 a 27 de novembro de 2015, os valores do índice Kp mantiveram-se baixos, apresentando um valor máximo de $Kp = 2+$ durante o dia 20 de novembro. Adicionalmente, devido à variação temporal do índice Kp observada nesta figura, verifica-se que o dia mais calmo do período é representado pelo dia 23 de novembro. Diante desta condição geomagneticamente calma, os valores de TEC para a estação virtual SJK apresentaram variações da ordem de 5-35 TECU durante todo o período.

Com relação à evolução temporal de curta escala no TEC deste período, observou-se que no dia 20, entre 00:00h e 06:00h UT, uma diferença negativa de 33 TECU (área hachurada 1) faz com que o LDIX apresente valores acima de 2 (perturbação moderada). Ainda no dia 20, observam-se variações da ordem de 18-30 TECU entre 20:00h e 03:00h UT (área hachurada 2), elevando o LDIX para valores entre 1 (perturbação leve) e 2. Próximo das 07:00h UT do dia 21 (área hachurada 3), surge no LDIX um pico com valor acima de 4 (perturbação intensa). Os mecanismos físicos das perturbações observadas nas áreas hachuradas 2 e 3 serão discutidos em detalhes no Capítulo 7. Finalmente, durante os dias 22, 24, 25 e 26 observam-se valores entre 1 e 2 no LDIX.

Com base nesta análise, o índice DIX não apresentou boa responsividade às variações diurnas. Contudo, observou-se que o índice LDIX conseguiu detectar de forma clara as variações diurnas dos dias 21, 24, 25 e 26.

5.2 Cálculo do LDIX durante períodos geomagneticamente perturbados

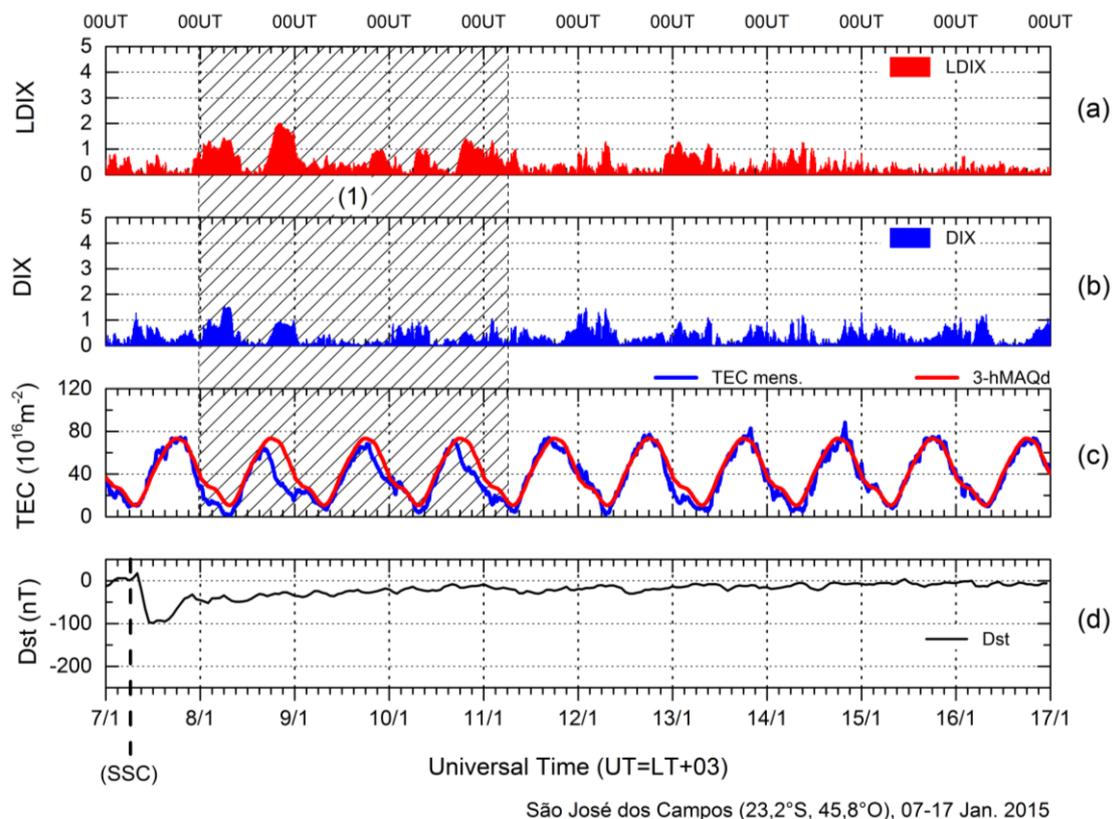
Esta seção aborda o comportamento do índice LDIX durante os períodos geomagneticamente perturbados listados na Seção 4.6. Com o objetivo de determinar o grau de perturbação local da ionosfera sobre SJK durante tempestades geomagnéticas, foram obtidos e comparados os gráficos dos índices LDIX e DIX para 5 períodos específicos de 2015, contendo dias geomagneticamente perturbados. Os períodos, por sua vez, foram selecionados de acordo com a ocorrência de tempestades geomagnéticas

durante o ano de 2015, tendo como referência a classificação de [Gonzalez et al. \(1994\)](#). Adicionalmente, utilizou-se o critério de selecionar (quando possível) períodos contendo tempestades geomagnéticas classificadas como intensas ou extremas. A partir da inclusão dos efeitos das perturbações geomagnéticas no cálculo do LDIX, pretendeu-se evidenciar os efeitos das variações características da ionosfera relacionadas a fontes externas (e.g. campos elétricos de penetração).

5.2.1 Tempestade geomagnética de 07 de janeiro de 2015

Na Figura 5.6, apresenta-se o primeiro resultado do LDIX calculado durante períodos geomagneticamente perturbados. Nesta, verifica-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 07 a 17 de janeiro de 2015, para a Estação Virtual de São José dos Campos (gráfico identificado pela letra a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do DIX, (c) do TEC e seu valor calmo de referência, bem como (d) os valores do índice Dst (d) para o mesmo período.

Figura 5.6 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética de 07 de janeiro de 2015.



Fonte: Produção do autor.

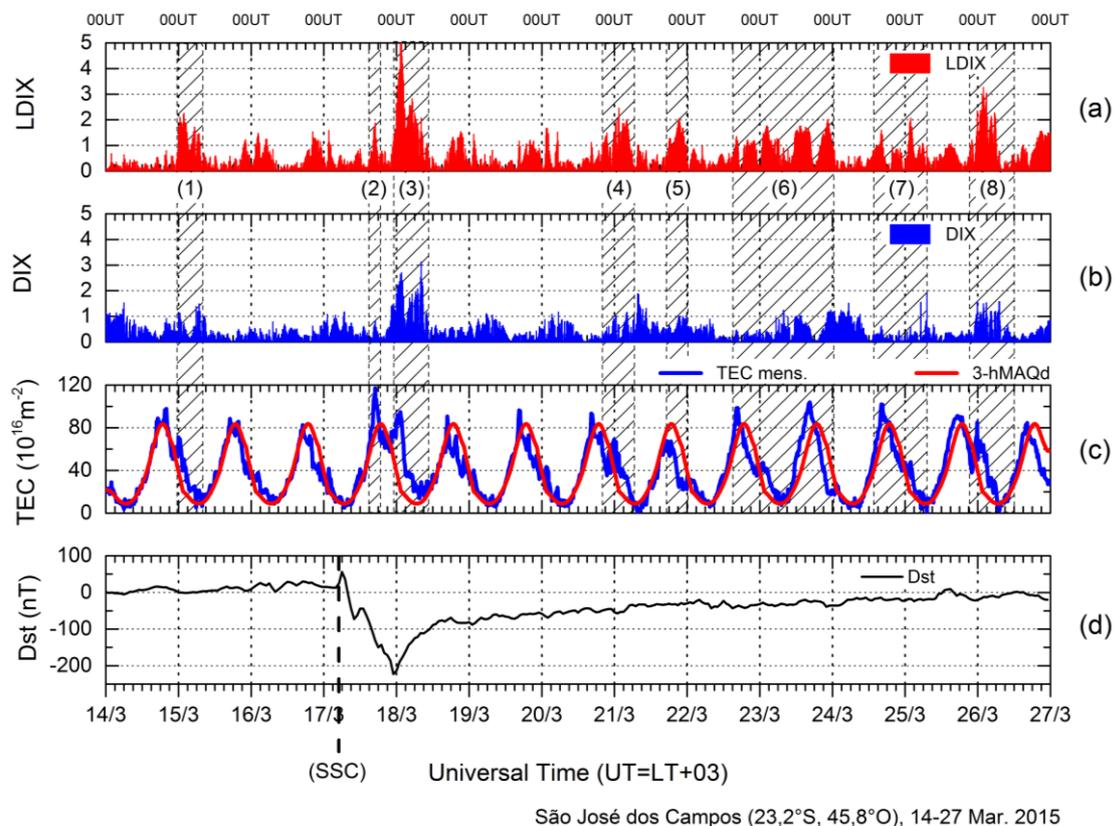
Ao longo deste período de estudo, os valores do índice Dst mantiveram-se próximos de zero durante a maior parte do período. No entanto, durante os dias 07, 08 e 09, uma tempestade geomagnética de intensidade moderada perturbou o campo magnético terrestre, fazendo com que os valores do índice Dst caíssem para aproximadamente -100 nT durante a fase principal da tempestade. No dia 10 de janeiro, os valores do índice Dst subiram para aproximadamente 10% do valor mínimo ocorrido durante a fase principal, o que caracterizou o fim da tempestade geomagnética (KAMIDE et al., 1998). Adicionalmente, verificou-se que o dia 15 de janeiro foi o mais calmo deste período de estudo.

Com relação à evolução temporal de curta escala do TEC neste período, observaram-se variações da ordem de 8-38 TECU. Portanto, verificou-se nos dados do índice LDIX a ocorrência de perturbações ionosféricas durante os dias 08, 09 e 10 de janeiro (área hachurada 1). Essas perturbações estão associadas a variações positivas e negativas observadas na curva de TEC, fazendo com que o valor do LDIX varie entre 1 (perturbação leve) e 2 (perturbação moderada). As perturbações tiveram início 18 horas após a ocorrência do *sudden storm commencement* (SSC), e 14 horas após o valor mínimo da fase principal da tempestade geomagnética. Após o fim da tempestade, durante os dias 12, 13 e 14, o índice LDIX detectou variações do TEC possivelmente atribuídas a fenômenos de origem interna. O DIX se comportou de forma similar ao índice LDIX, respondendo às perturbações ionosféricas durante todo o período. Observou-se, ainda, que após o fim da tempestade geomagnética os valores de TEC mensurados tenderam a se aproximar dos valores do dia de referência.

5.2.2 Tempestade geomagnética do dia de St. Patrick

Na Figura 5.7, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 14 a 27 de março de 2015, para a Estação Virtual de São José dos Campos (gráfico representado pela linha a). Ainda nesta figura, são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do índice DIX, (c) do TEC e seu respectivo valor calmo de referência, bem como (d) os valores do índice Dst para o mesmo período.

Figura 5.7- Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética do dia de St. Patrick.



Fonte: Produção do autor.

Ao longo deste período de estudo, os valores do índice Dst mantiveram-se próximos de zero durante os dias 14, 15 e 16. Contudo, no dia 17 de março a ocorrência de uma tempestade geomagnética extrema fez com que o valor do índice Dst diminuísse para aproximadamente -223 nT durante a fase principal da tempestade. Devido a isso, esta tempestade foi considerada a mais intensa do ciclo solar 24 (ASTAFYEVA et al., 2015). Ressalta-se também que este evento é conhecido como tempestade geomagnética do dia de St. Patrick, e seus efeitos na ionosfera têm sido constantemente estudados (ASTAFYEVA et al., 2015; WU et al., 2016; VENKATESH et al., 2017; BARBOSA et al., 2018; FIGUEIREDO et al., 2018). Com relação à evolução temporal do evento geomagnético, a fase de recuperação da tempestade chegou ao fim no dia 25

de março, com os valores do índice Dst se aproximando de zero por volta das 13:00h UT (MAURYA et al., 2018). Adicionalmente, verificou-se que o dia 14 de março foi o mais calmo deste período de estudo.

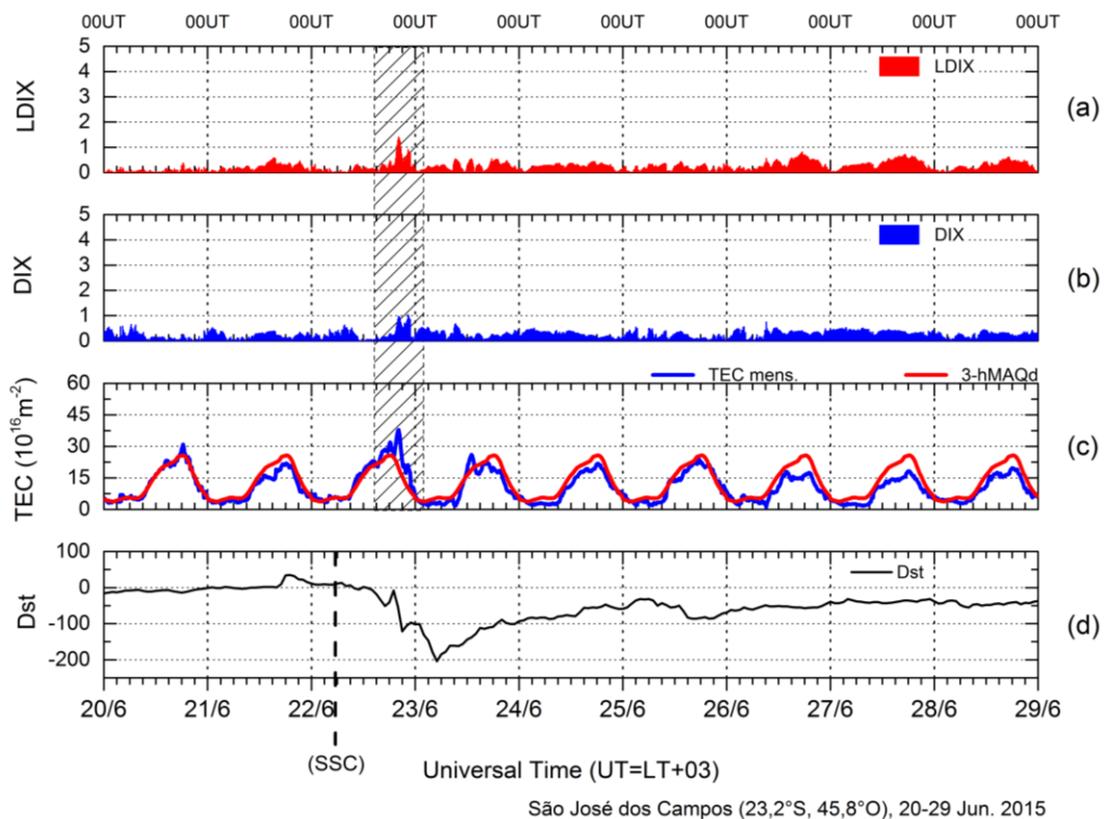
Com relação à evolução temporal de curta escala no TEC deste período, observaram-se variações da ordem de 5-70 TECU. Portanto, verificou-se no índice LDIX a ocorrência de perturbações ionosféricas durante quase todo o período. Durante o dia 15 de março, o LDIX apresentou valores próximos de 2 (perturbação moderada), devido a variações no TEC possivelmente associadas a fenômenos de transporte do plasma ionosférico (área hachurada 1). Nos dias 16 e 17, os valores do índice LDIX permaneceram entre 1 e 2 (perturbação leve), principalmente no período noturno, no intervalo de tempo entre 22:00h e 09:00h UT. Verifica-se no dia 17, durante a fase principal da tempestade (15:00h-18:00h), um aumento no TEC área (hachurada 2), ocasionando uma perturbação leve no LDIX. No entanto, o mesmo aumento não é identificado pelo índice DIX. No dia 18, aproximadamente 20 horas após a ocorrência do SSC, e 2 horas após a o valor mínimo da fase principal, o LDIX detectou uma variação ionosférica da ordem de 70 TECU (área hachurada 3), elevando seu valor para 5 (perturbação intensa). Perturbações de ordem 1 e 2 podem ser observadas no decorrer do período (áreas hachuradas 4, 5, 6 e 7), bem como perturbações de ordem 3 e 4 durante o dia 26 (área hachurada 8). Ressalta-se que as respostas ionosféricas observadas durante este evento serão discutidas de forma mais detalhada no Capítulo 6 deste trabalho.

Com base nesta análise, observa-se que o DIX se comportou de forma similar ao índice LDIX, respondendo às perturbações ionosféricas durante todo o período. No entanto, ressalta-se que algumas perturbações ionosféricas ocorridas durante os dias 16, 17, 22 e 25 foram atenuadas pelo índice DIX (área hachurada 5).

5.2.3 Tempestade geomagnética de 22 de junho de 2015

Na Figura 5.8, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 20 a 29 de junho de 2015, para a Estação Virtual SJK (gráfico representado pela linha a). Ainda nesta figura, são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do índice DIX, (c) do TEC e seu respectivo valor calmo de referência, bem como (d) os valores do índice Dst para o mesmo período de estudo.

Figura 5.8 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética de 21 de junho de 2015.



Fonte: Produção do autor.

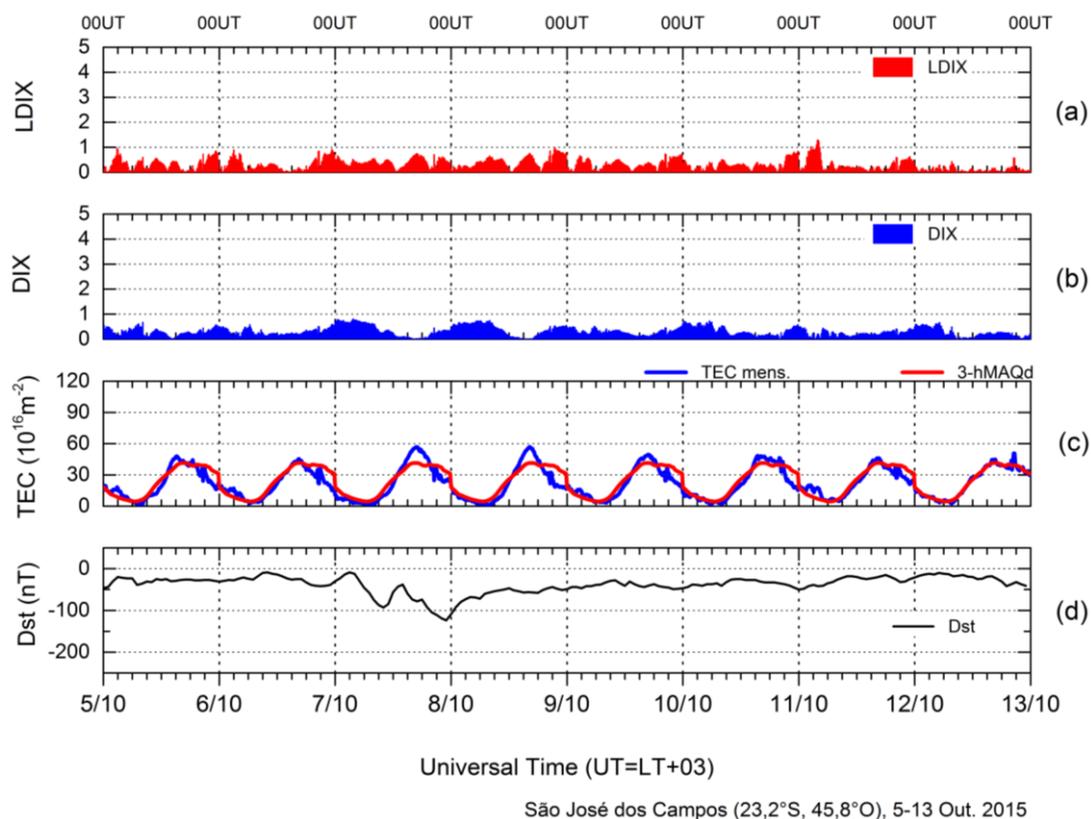
Ao longo deste período de estudo, os valores do índice Dst mantiveram-se próximos de zero durante o dia 20 e parte do dia 21. No entanto, às 05:45h UT do dia 22, foi registrado o início de uma tempestade geomagnética extrema (ASTAFYEVA et al., 2016). O evento geomagnético fez com que o valor do índice Dst diminuísse para aproximadamente -204 nT durante a fase principal da tempestade, que se desenvolveu durante os dias 22 e 23 de junho. Dado o valor mínimo atingido pelo índice Dst, a tempestade do dia 22 foi considerada a segunda mais intensa do ciclo solar 24. Ressalta-se que este evento geomagnético foi provocado pelos impactos sequenciais de duas CMEs com o campo magnético terrestre (MOHANTY et al., 2016). No entanto, os efeitos mais intensos da tempestade foram observados no hemisfério Norte, na região ionosférica de altas latitudes (ASTAFYEVA et al., 2015). Adicionalmente, verificou-se que o dia 20 de junho foi o mais calmo deste período de estudo.

Com relação à evolução temporal de curta escala do TEC neste período, observaram-se variações da ordem de 5-20 TECU. No entanto, verificou-se no índice LDIX a ocorrência de perturbações ionosféricas de ordem 1 apenas durante o dia 22 de junho (área hachurada). No decorrer dos outros dias, variações positivas e negativas foram observadas no TEC. Contudo, essas variações não impulsionaram o índice LDIX para valores acima de 1. Finalmente, verificou-se que os valores do índice DIX se comportaram de forma similar aos do índice LDIX. Ressalta-se que as respostas ionosféricas observadas durante este evento serão discutidas de forma mais detalhada no Capítulo 6 deste trabalho.

5.2.4 Tempestade geomagnética de 07 de outubro de 2015

Na Figura 5.9, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 05 a 13 de outubro de 2015, para a Estação Virtual SJK (gráfico representado pela letra a). Ainda nesta figura, são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do índice DIX, (c) do TEC e seu valor calmo de referência, bem como (d) os valores do índice Dst para o mesmo período de estudo.

Figura 5.9 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética de 07 de outubro de 2015.



Fonte: Produção do autor.

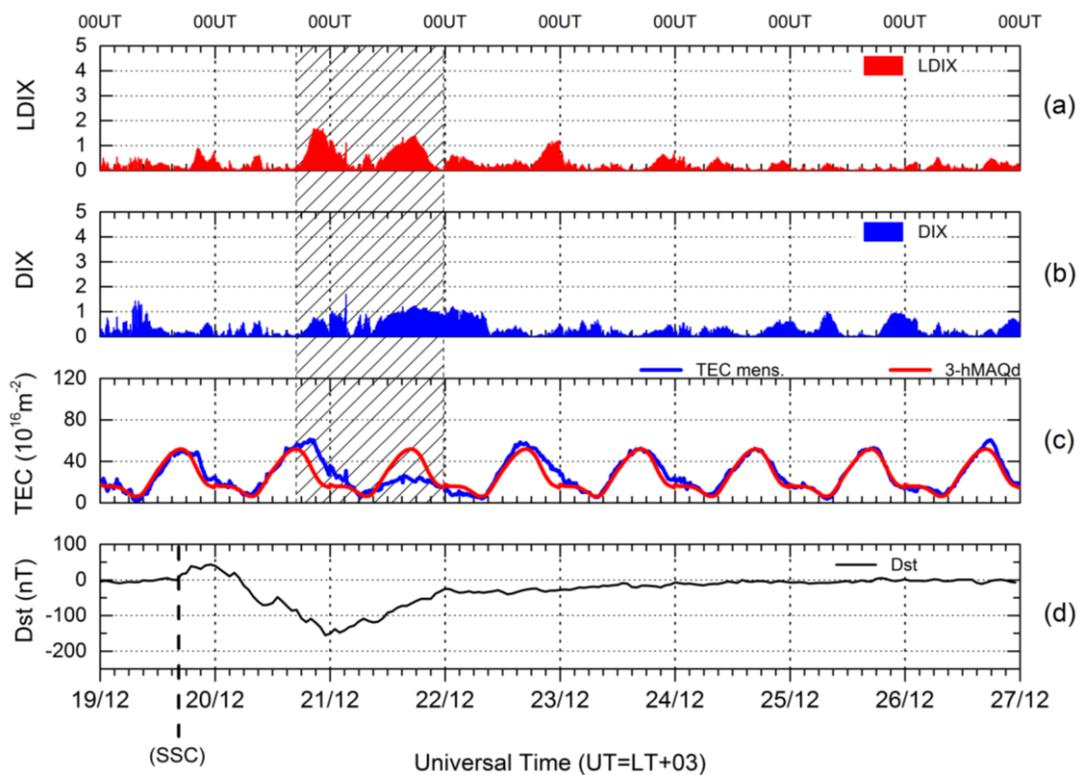
Ao longo deste período de estudo, os valores do índice Dst mantiveram-se entre 0 nT e -45 nT durante os dias 05 e 06. No entanto, observa-se que uma tempestade geomagnética intensa teve início durante o dia 07 de outubro, fazendo com que o valor do índice Dst diminuísse para aproximadamente -120 nT durante a fase principal da tempestade. Ressalta-se que, ao contrário das tempestades geomagnéticas listadas anteriormente, esta tempestade foi ocasionada por um fenômeno do tipo *high-speed stream* (feixe de vento solar), atingindo a magnetosfera e perturbando o campo magnético terrestre durante os dias 07 e 08 de outubro de 2015 (NAVIA et al., 2018). Adicionalmente, verificou-se que o dia 12 de outubro foi o mais calmo deste período de estudo.

Com relação à evolução temporal de curta escala do TEC neste período, observaram-se variações da ordem de 5-15 TECU. No entanto, não foram observadas perturbações ionosféricas de grande amplitude nos índices LDIX e DIX.

5.2.5 Tempestade geomagnética de 20 de dezembro de 2015

Na Figura 5.10, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 19 a 27 de dezembro de 2015, para a Estação Virtual SJK (gráfico representado pela letra a). Ainda nesta figura, são apresentadas as variações temporais dos valores (b) do índice DIX, (c) do TEC e seu valor calmo de referência, bem como (d) os valores do índice Dst para o mesmo período de estudo.

Figura 5.10 - Variação temporal dos índices (a) LDIX e (b) DIX, juntamente com (c) o TEC e seu valor calmo de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Dst durante o período que inclui a tempestade geomagnética de 20 de dezembro de 2015.



São José dos Campos (23,2°S, 45,8°O), 19-27 Dez. 2015

Fonte: Produção do autor.

Ao longo deste período de estudo, os valores do índice Dst mantiveram-se próximos de zero durante a maior parte do dia 19 de dezembro. Contudo, às 16:16h UT do dia 19, o Dst registrou o início súbito de uma tempestade geomagnética intensa. Este evento fez com que o valor do índice Dst diminuísse para aproximadamente -155 nT durante a fase principal da tempestade geomagnética, que se desenvolveu durante o dia 20 de dezembro. Nesse contexto, ressalta-se que esta tempestade geomagnética ocorreu devido ao impacto de uma ejeção de massa coronal com a magnetosfera, perturbando o campo geomagnético e causando forte cintilação ionosférica em sistemas de telecomunicação em altas latitudes (LOUCKS et al., 2017; CHASHEI et al., 2016). Adicionalmente, verificou-se que o dia 25 de dezembro foi o mais calmo deste período de estudo.

Com relação à evolução temporal de curta escala do TEC neste período, observaram-se variações da ordem de 8-30 TECU. Dessa forma, verificou-se nos valores do índice LDIX a ocorrência de perturbações ionosféricas de ordem 1 (perturbações leves) durante os dias 20 e 21 de dezembro (área hachurada). Essas perturbações ocorreram aproximadamente 24 horas depois do SSC e 18 horas após o valor mínimo da fase principal da tempestade. Observou-se, ainda, a ocorrência de perturbações leves durante o dia 23. Finalmente, ressalta-se que o índice DIX se comportou de forma similar ao LDIX. No entanto, ressalta-se que as perturbações do dia 23 não foram detectadas pelo índice DIX, que apresentou valores próximos de zero durante esse dia.

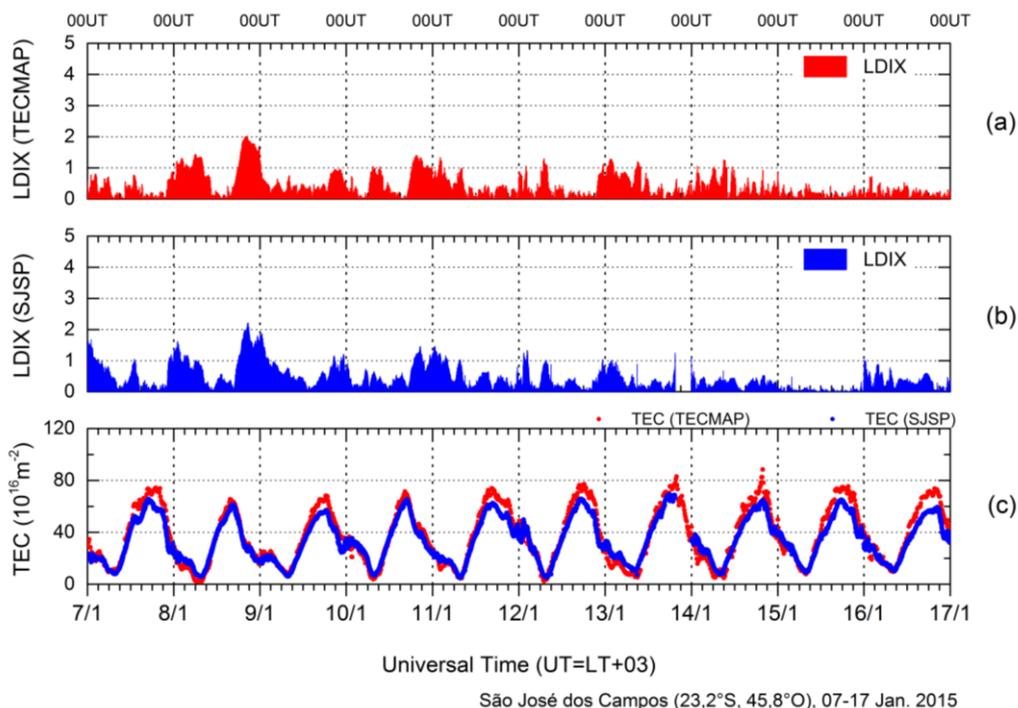
5.3 Validação do LDIX utilizando dados de TEC da estação SJSP

Os dados de TEC utilizados neste trabalho foram obtidos a partir da metodologia descrita no Capítulo 4, que inclui uma suavização temporal a partir do uso de médias móveis. No entanto, devido à utilização de médias móveis, frequências artificiais podem ser inseridas durante o cálculo dos TECMAPs, fazendo com que algumas variações no TEC sejam superestimadas. Portanto, para avaliar o impacto da utilização de dados de TECMAPs no cálculo do LDIX,

foram obtidos os valores do índice a partir de dados suavizados (TECMAPs) e não suavizados (estação SJSP), e comparados durante diferentes períodos. Como o LDIX é um índice relativo, representando a variação do TEC a partir de um determinado referencial, entende-se que os efeitos de flutuações de amplitude do TEC sejam atenuados a partir da propagação do erro da curva de TEC para a curva do valor calmo de referência. Adicionalmente, ressalta-se que os dados de TEC da estação SJSP (São José dos Campos) foram obtidos por meio da técnica INPE, descrita em Carmo (2018).

Na Figura 5.11, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 07 a 17 de janeiro de 2015, para a Estação SJK (gráfico identificado pela letra a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentadas as variações temporais (b) do LDIX calculado a partir dos dados da estação SJSP e (c) dos valores de TEC obtidos dos TECMAPs e da estação SJSP para o mesmo período.

Figura 5.11 - Gráficos de variação temporal do (a) LDIX calculado a partir do TEC dos TECMAPs (SJK) e (b) do LDIX calculado a partir do TEC da estação SJSP, juntamente com (c) os valores de TEC obtidos durante o período de 07 a 17 de janeiro de 2015.

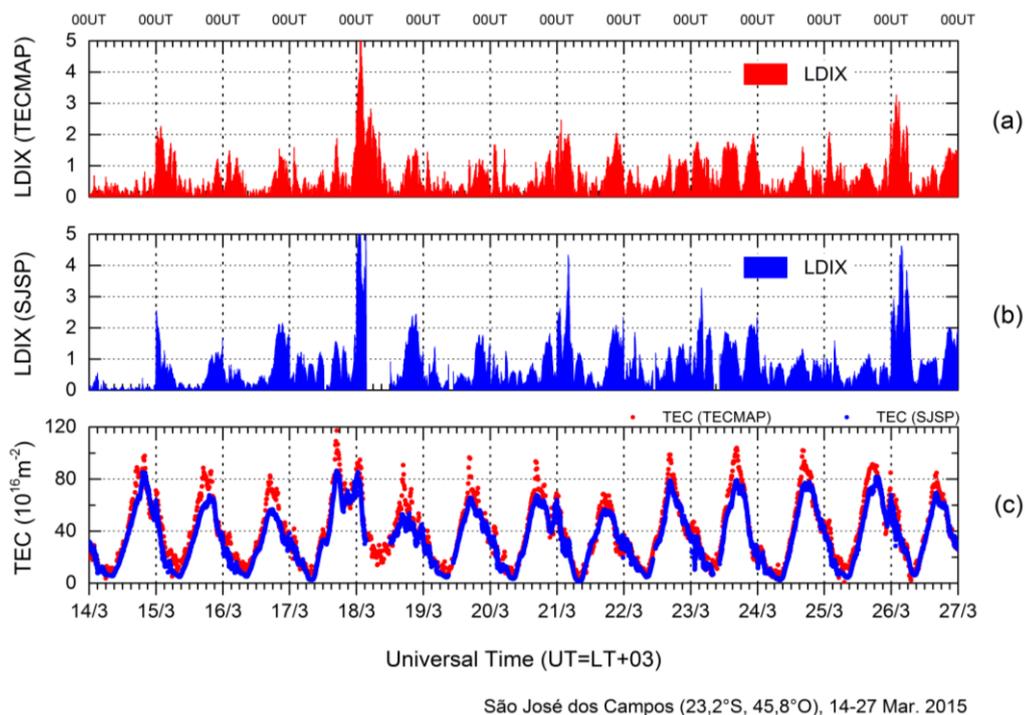


Fonte: Produção do autor.

Observa-se que a variação temporal do TEC obtido dos TECMAPS (símbolos vermelhos) apresenta pequenas variações em amplitude quando comparado com o TEC da estação SJSP (símbolos azuis). Tais diferenças ocorrem devido à forma de obtenção do TEC, feita a partir da Estação Virtual, enquanto que o TEC da estação SJSP é obtido diretamente dos dados de GPS. Adicionalmente, verifica-se que o índice LDIX se comporta de forma similar com relação a ambas às fontes de dados de TEC, apresentando picos nos mesmos horários, cujas amplitudes também são coerentes entre si. Ressalta-se, ainda, que a ausência de observações na estação SJSP impossibilita o cálculo do TEC para um determinado intervalo de tempo no dia 13 de janeiro. Finalmente, verificou-se que para este caso a diferença entre os valores do índice LDIX calculado a partir das duas metodologias diferentes de obtenção do TEC foi de 8,49%.

Na Figura 5.12, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 14 a 27 de março de 2015, para a Estação SJK (gráfico identificado pela letra a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentadas as variações temporais (b) do LDIX calculado a partir dos dados da estação SJSP e (c) dos valores de TEC obtidos dos TECMAPs e da estação SJSP para o mesmo período.

Figura 5.12 - Gráficos de variação temporal do (a) LDIX calculado a partir do TEC dos TECMAPs (SJK) e (b) do LDIX calculado a partir do TEC da estação SJSP, juntamente com (c) os valores de TEC obtidos durante o período de 14 a 27 de março de 2015.



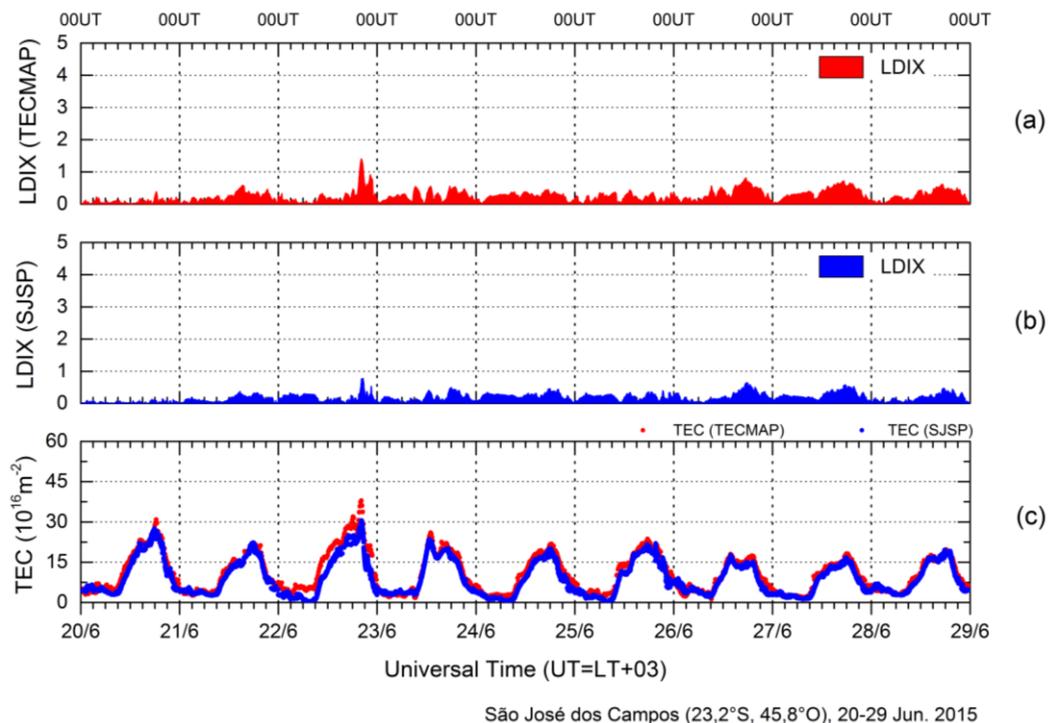
Fonte: Produção do autor.

Assim como constatado na Figura 5.11, observam-se diferenças nos valores de TEC obtidos dos TECMAPs (símbolos vermelhos), em comparação ao TEC obtido da estação SJSP (símbolos azuis). No entanto, tais diferenças não são refletidas de forma significativa no comportamento do LDIX. Com relação a este período de estudo, observam-se picos relativos a perturbações ionosféricas no LDIX calculado a partir de ambas as fontes de dados. Verifica-se, também, que os picos ocorrem durante os mesmos horários. Adicionalmente, observa-se que as amplitudes das perturbações observadas apresentam similaridades nos dois casos. Essa característica evidencia o caráter relativo da equação do índice LDIX. No contexto da variação temporal do TEC, observam-se amplitudes maiores nos máximos de concentração eletrônica da curva obtida a partir dos TECMAPs. No entanto, verifica-se que ambas as curvas variam de forma coerente no tempo. Ressalta-se, ainda, que

a ausência de observações na estação SJSP impossibilita o cálculo do TEC para um determinado intervalo de tempo no dia 18 de janeiro. Finalmente, verificou-se que para este caso a diferença entre os valores do índice LDIX calculado a partir das duas metodologias diferentes de obtenção do TEC foi de 12,80%.

Na Figura 5.13, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 20 a 29 de junho de 2015, para a Estação SJK (gráfico identificado pela letra a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentadas as variações temporais (b) do LDIX calculado a partir dos dados da estação SJSP e (c) dos valores de TEC obtidos dos TECMAPs e da estação SJSP para o mesmo período.

Figura 5.13 - Gráficos de variação temporal do (a) LDIX calculado a partir do TEC dos TECMAPs e (b) do LDIX calculado a partir do TEC da estação SJSP, juntamente com (c) os valores de TEC obtidos durante o período de 20 a 29 de junho de 2015.

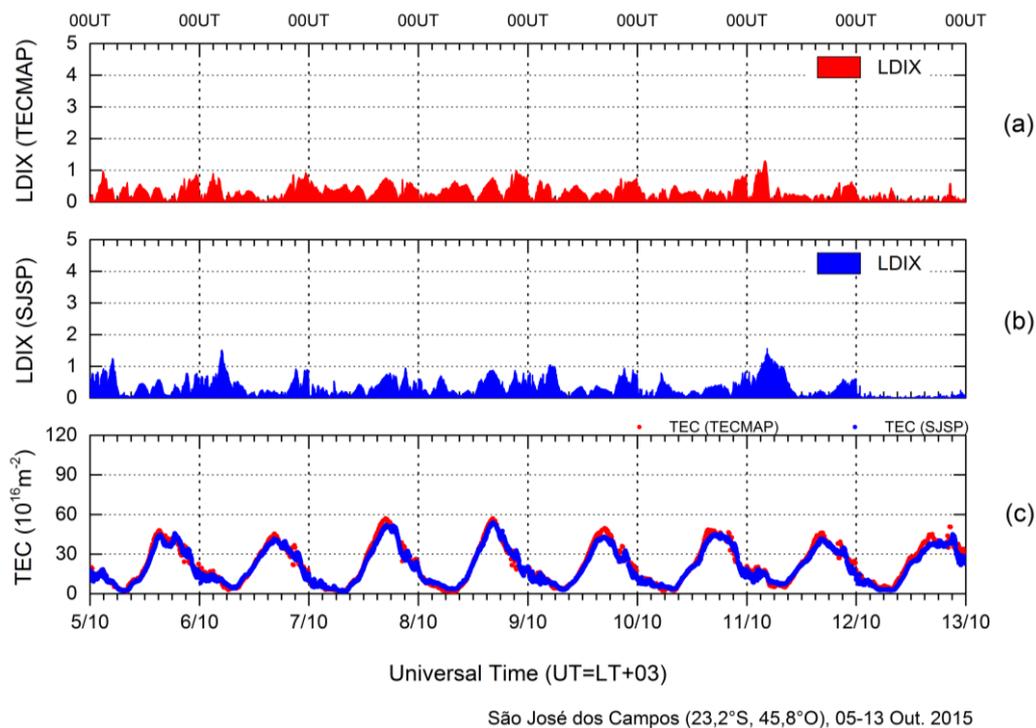


Fonte: Produção do autor.

Com relação a este período de estudo, observam-se picos relativos a perturbações ionosféricas no LDIX calculado a partir de ambas as fontes de dados de TEC. Adicionalmente, verifica-se que os picos observados ocorrem durante os mesmos horários. Ressalta-se que para este período de estudo o LDIX calculado a partir do TEC da estação SJSP apresenta amplitudes menores do que o LDIX calculado a partir do TEC obtido dos TECMAPs. Ainda nesse contexto, observa-se a ocorrência de amplitudes um pouco maiores no TEC obtido dos TECMAPs durante o dia 22 de junho. Contudo, ambas as curvas variam de forma coerente no tempo. Finalmente, verificou-se que neste caso a diferença entre os valores do índice LDIX calculado a partir das duas metodologias diferentes de obtenção do TEC foi de 4,59%.

Na Figura 5.14, apresenta-se o comportamento do índice LDIX durante o período de 05 a 13 de outubro de 2015, para a Estação SJK (gráfico identificado pela letra a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentadas as variações temporais (b) do LDIX calculado a partir dos dados da estação SJSP e (c) dos valores de TEC obtidos dos TECMAPs e da estação SJSP para o mesmo período.

Figura 5.14 - Gráficos de variação temporal do (a) LDIX calculado a partir do TEC dos TECMAPs e (b) do LDIX calculado a partir do TEC da estação SJSP, juntamente com (c) os valores de TEC obtidos durante o período de 05 a 13 de outubro de 2015.



Fonte: Produção do autor.

Com relação a este período de estudo, observa-se que o índice LDIX se comportou de forma equivalente para os dois casos. Dessa forma, observaram-se picos coerentes no LDIX calculado a partir de ambas as fontes de dados de TEC. Ainda nesse contexto, não foram observadas diferenças significantes de amplitude entre os máximos de concentração eletrônica das curvas de TEC. Ressalta-se, ainda, que ambas as curvas variaram de forma coerente no tempo. Finalmente, verificou-se que neste caso a diferença entre os valores do índice LDIX calculado a partir das duas metodologias diferentes de obtenção do TEC foi de 5,67%.

Na Tabela 5.1, apresentam-se as diferenças calculadas entre o LDIX calculado a partir das duas metodologias diferentes de obtenção do TEC, para cada um dos casos apresentados nesta seção.

Tabela 5.1 - Diferenças entre os valores de LDIX calculados a partir das duas metodologias de obtenção do TEC, para cada um dos períodos apresentados.

Período de estudo (2015)	Diferença entre os valores do LDIX	Diferença média entre os valores do LDIX
07-17 de janeiro	8,49%	7,89%
14-27 de março	12,80%	
20-29 de junho	4,59%	
05-13 de outubro	5,67%	

Fonte: Produção do autor.

De acordo com os valores apresentados nesta tabela, a diferença média entre os valores do índice LDIX, calculados a partir das duas metodologias diferentes de obtenção do TEC, foi de 7,89%.

Com base na análise feita nesta seção, verificou-se que a metodologia de utilização dos dados de TEC obtidos das Estações Virtuais é válida. Adicionalmente, ressalta-se que a diferença média entre as observações do LDIX pode ser atenuada a partir da definição de um valor de coeficiente k específico para os dados de TEC obtidos a partir da metodologia utilizada.

5.4 Verificação da significância física do LDIX a partir do parâmetro foF2

Com o intuito de verificar a significância física das variações observadas no índice LDIX, foram obtidos os valores do índice para dois períodos geomagneticamente perturbados. Dessa forma, o LDIX obtido durante esses períodos foi comparado com a taxa de variação do parâmetro foF2 (frequência crítica da camada F₂) obtida durante os mesmos períodos. Assim, pretendeu-se relacionar o comportamento do LDIX às variações do parâmetro foF2, uma medida amplamente utilizada para descrever o comportamento físico da ionosfera (ABDU et al., 1983, 2002, 2008; BATISTA et al., 1990, 1996, 2006).

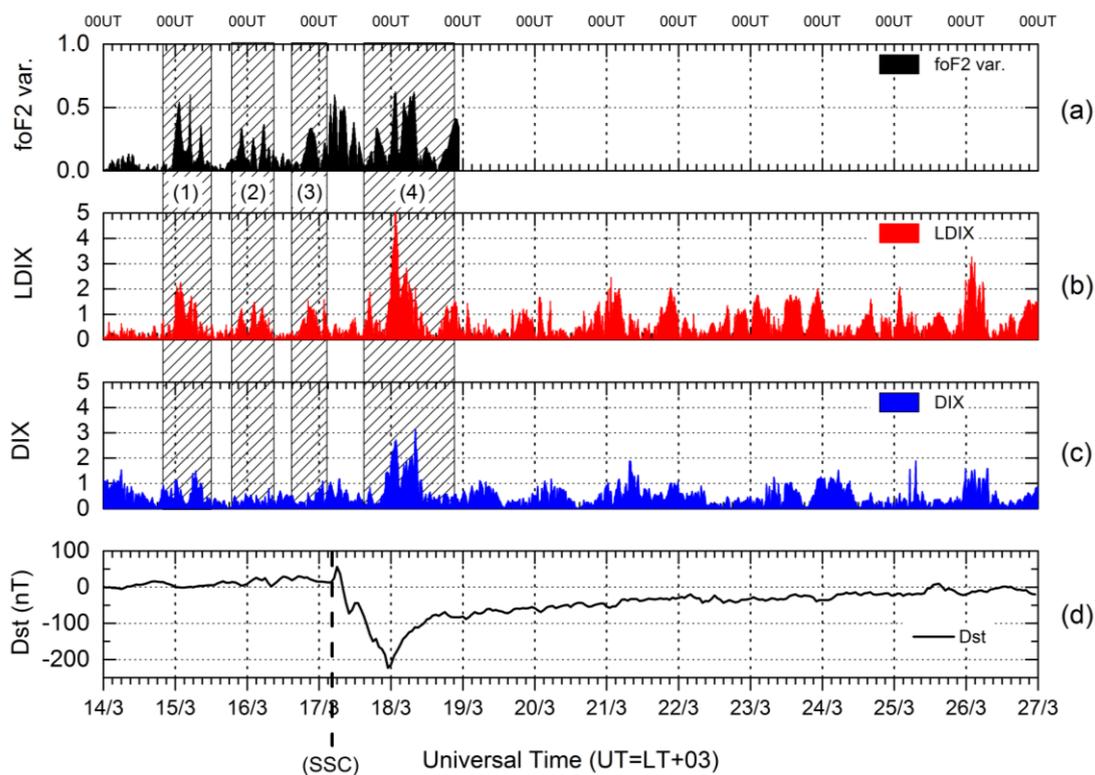
Os dados do parâmetro foF2 foram obtidos por meio da ionossonda do INPE localizada em Cachoeira Paulista (CPA, 22,67°S, 44,99°O). A taxa de variação do parâmetro foF2 foi calculada a partir da seguinte equação:

$$foF2_{var.} = \left| \frac{foF2_i - foF2_i^{Qd}}{foF2_i^{Qd}} \right|, \quad (5.1)$$

na qual $foF2_i$ representa o valor do foF2 para um determinado horário e $foF2_i^{Qd}$ representa o foF2 para o mesmo horário, porém obtido durante um dia calmo de referência.

Na Figura 5.15, apresenta-se a taxa de variação do parâmetro foF2 durante o período de 14 a 27 de março de 2015, obtida a partir dos dados da ionossonda localizada em CPA (gráfico identificado pela letra a). Também são apresentados os valores dos índices (b) LDIX, (c) DIX e (d) Dst para o mesmo período de estudo.

Figura 5.15 – Gráficos da taxa de variação do parâmetro (a) foF2 e dos índices (b) LDIX, (c) DIX e (d) Dst, durante o período de 14 a 27 de março de 2015.



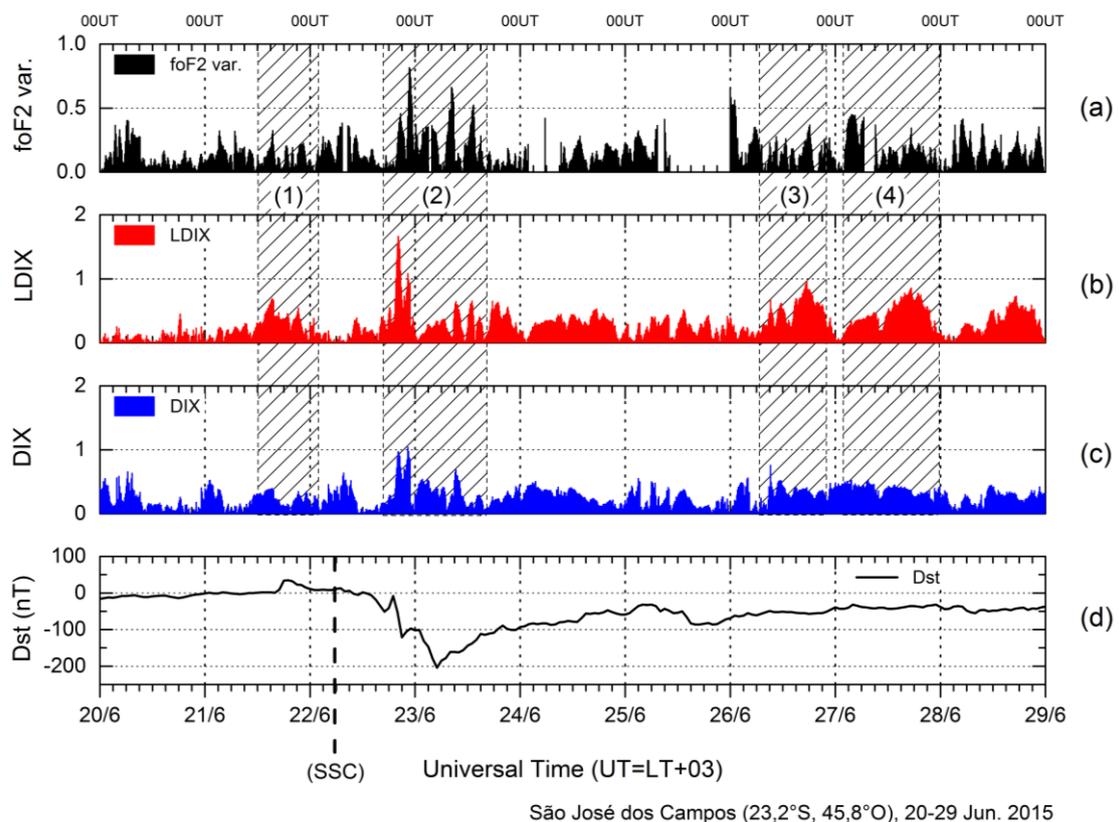
São José dos Campos (23,2°S, 45,8°O), 14-27 Mar. 2015

Fonte: Produção do autor.

Ao longo do período estudado na Figura 5.15, observa-se que as variações do índice LDIX são coerentes com a variação do parâmetro foF2, durante a tempestade geomagnética de 17 de março, ilustrada pelo índice Dst. Dessa forma, o comportamento do índice LDIX indica uma forte relação física entre os dados de ambos os parâmetros (LDIX e foF2). Adicionalmente, observam-se durante os dias 15, 16 e 18 picos na taxa de variação do parâmetro foF2 que também podem ser observados no índice LDIX (áreas hachuradas 1, 2, 3 e 4). Com relação ao índice DIX, verifica-se que os picos são observados de forma clara apenas no dia 18, durante a fase principal da tempestade geomagnética (área hachurada 4).

Na Figura 5.16, apresenta-se a taxa de variação do parâmetro foF2 durante o período de 20 a 29 de junho de 2015, obtida a partir dos dados da ionossonda localizada em CPA (gráfico identificado pela letra a). Também são apresentados os valores dos índices (b) LDIX, (c) DIX e (d) Dst para o mesmo período de estudo.

Figura 5.16 – Gráficos da taxa de variação do parâmetro (a) foF2 e dos índices (b) LDIX, (c) DIX e (d) Dst, durante o período de 20 a 29 de junho de 2015.



Fonte: Produção do autor.

Ao longo deste período de estudo, observa-se que as variações do índice LDIX são coerentes com os valores observados na taxa de variação do parâmetro foF2, durante a tempestade geomagnética observada no índice Dst. Dessa forma, o comportamento do índice LDIX indica uma forte relação física entre os valores de ambos os parâmetros (LDIX e foF2). Adicionalmente, observam-se, durante os dias 21, 23, 26 e 27, picos na taxa de variação do parâmetro foF2

que também podem ser observados no índice LDIX (áreas hachuradas 1, 2, 3 e 4). No entanto, no caso do índice DIX, os picos são observados de forma clara apenas no dia 23, durante a fase principal da tempestade geomagnética (área hachurada 2).

Com base nesta análise, verificou-se que o índice LDIX respondeu de maneira similar às variações observadas no parâmetro foF2. Esse comportamento indica uma forte relação entre os processos físicos detectados pelo LDIX e os processos que modificam a ionosfera, detectados pelo parâmetro foF2. Em contrapartida, verificou-se que o índice DIX não apresentou o mesmo comportamento observado na taxa de variação do parâmetro foF2. Essa condição atesta que o índice DIX é capaz de detectar variações de grande amplitude no TEC, porém não é sensível a pequenas flutuações no mesmo.

6 ESTUDO FENOMENOLÓGICO DAS VARIAÇÕES OBSERVADAS NO LDIX DURANTE DOIS PERÍODOS GEOMAGNETICAMENTE PERTURBADOS

Este capítulo é dedicado a apresentar os resultados do estudo fenomenológico das variações observadas com o índice LDIX. Este estudo foi realizado com base em dois períodos geomagneticamente perturbados, previamente selecionados para o ano de 2015. Dessa forma, foram utilizados dados dos parâmetros de ionossonda h'F (altura de base da camada F) e foF2, assim como dados de TEC obtidos dos TECMAPs do Programa Embrace/INPE. Também foram utilizados os índices geomagnéticos Dst e AE (Auroral Electrojet), sendo este incluído por quantificar as variações observadas nos eletrojetos aurorais. Adicionalmente, foram utilizados dados do parâmetro magnético ΔH , que corresponde à variação da componente H do campo geomagnético com relação a um referencial geomagneticamente calmo. Assim sendo, os resultados serão discutidos em termos dos fenômenos causadores das variações observadas nos parâmetros já conhecidos na literatura científica, em contraste com as variações observadas no LDIX.

Nesse contexto, os fenômenos causadores das tempestades geomagnéticas podem apresentar diversas origens. Dentre elas, destacam-se os choques interplanetários ocasionados pelo aumento da injeção de energia do vento solar durante a ocorrência de Ejeções de Massa Coronal e *high-speed streams* (VENKATESH et al., 2017). As ondas de choque originadas a partir desses fenômenos promovem a compressão da magnetosfera terrestre, ocasionando perturbações no campo geomagnético. Dessa forma, os eventos de liberação de energia no Sol podem afetar a ionosfera de forma complexa, ocasionando perturbações que podem ser observadas em diversas faixas de latitude.

Em contrapartida, durante períodos geomagneticamente calmos sabe-se que a ionosfera equatorial e de baixas latitudes apresenta variabilidade espaço-temporal significativa, sendo caracterizada principalmente pela ocorrência de

fenômenos como o eletrojato equatorial (EEJ), o Spread-F, a EIA e as bolhas de plasma. Contudo, durante períodos geomagneticamente perturbados, as perturbações causadas por campos elétricos de penetração direta e campos elétricos do dínamo perturbado (DDEF, do inglês “*Disturbance Dynamo Electric Fields*”) podem ocasionar severas alterações nos processos que envolvem a eletrodinâmica da ionosfera equatorial, afetando também a ionosfera em baixas latitudes (ASTAFYEVA et al., 2015, 2017; VENKATESH et al., 2017).

Adicionalmente, a densidade eletrônica da ionosfera pode aumentar ou diminuir durante tempestades geomagnéticas. Esses processos são conhecidos como tempestades ionosféricas positivas ou negativas. Para o caso das tempestades ionosféricas positivas, o aumento da razão O/N_2 , os ventos termosféricos, e a ocorrência de PPEFs e DDEFs são as principais causas, enquanto que para as tempestades ionosféricas negativas, o principal fator que promove a redução do TEC é a diminuição da razão O/N_2 (RISHBETH, 1991; FULLER-ROWELL et al., 1996). Além disso, a densidade eletrônica pode também ser diminuída em função dos efeitos de transporte do plasma, o que pode ocorrer devido à deriva do plasma ou por ventos neutros.

Diante dos conceitos abordados, serão apresentados e discutidos os resultados de dois estudos de caso da observação de perturbações ionosféricas no LDIX durante períodos geomagneticamente perturbados. Para isso, foram selecionados dois dos casos apresentados e discutidos no Capítulo 5: o período referente à tempestade geomagnética de St. Patrick e o período referente à tempestade geomagnética de 21 de junho de 2015.

6.1 Análise para a tempestade geomagnética do dia de St. Patrick

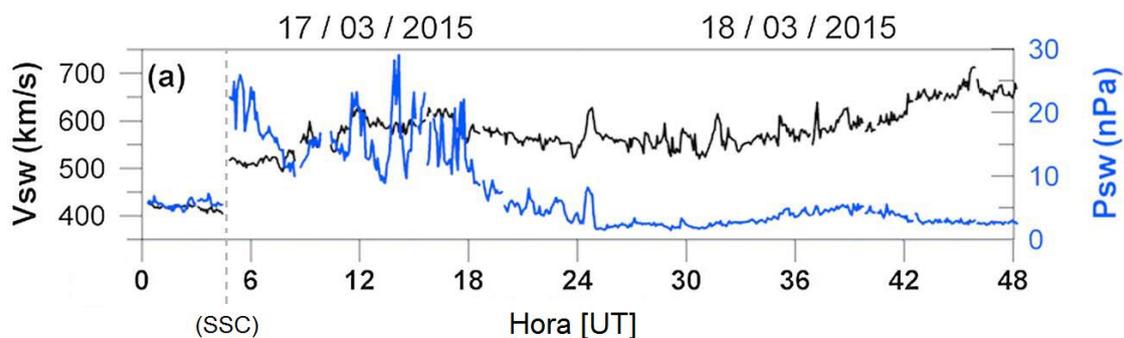
A tempestade geomagnética do dia de St. Patrick ocorreu durante o dia 17 de março de 2015, sendo considerada a mais forte do ciclo solar 24. Durante a fase principal da tempestade, observou-se um valor mínimo de -223 nT no índice Dst, enquanto que o índice AE apresentou valores acima de 2000 nT. Diversos estudos sobre a tempestade geomagnética do dia de St. Patrick têm sido feitos com o intuito de investigar os efeitos na ionosfera em várias faixas

de latitude (ASTAFYEVA et al., 2015, 2017; FAGUNDES et al., 2016; VENKATESH et al., 2017; BARBOSA et al., 2018; MAURYA et al., 2018).

O início súbito da tempestade geomagnética de St. Patrick foi registrado às 04:45h UT do dia 17 de março de 2015, quando uma CME do tipo halo atingiu a magnetosfera terrestre (MAURYA et al., 2018). A ejeção da CME ocorreu entre 00:45h UT e 02:00h UT do dia 15 de março, estando relacionada a uma explosão solar de classe C9 proveniente da mancha solar AR2297 (ASTAFYEVA et al., 2015; VENKATESH et al., 2017).

Na Figura 6.1 estão apresentados os registros gráficos da variação de velocidade (V_{sw} , linha preta) e pressão (P_{sw} , linha azul) do vento solar durante os dias 17 e 18 de março de 2015. Neste registro, observa-se um rápido aumento (SSC) na velocidade e na pressão do vento solar às 04:45h UT, horário de ocorrência do início súbito da tempestade geomagnética do dia de St. Patrick.

Figura 6.1 - Variações de velocidade e pressão do vento solar durante os dias 17 e 18 de março de 2015.

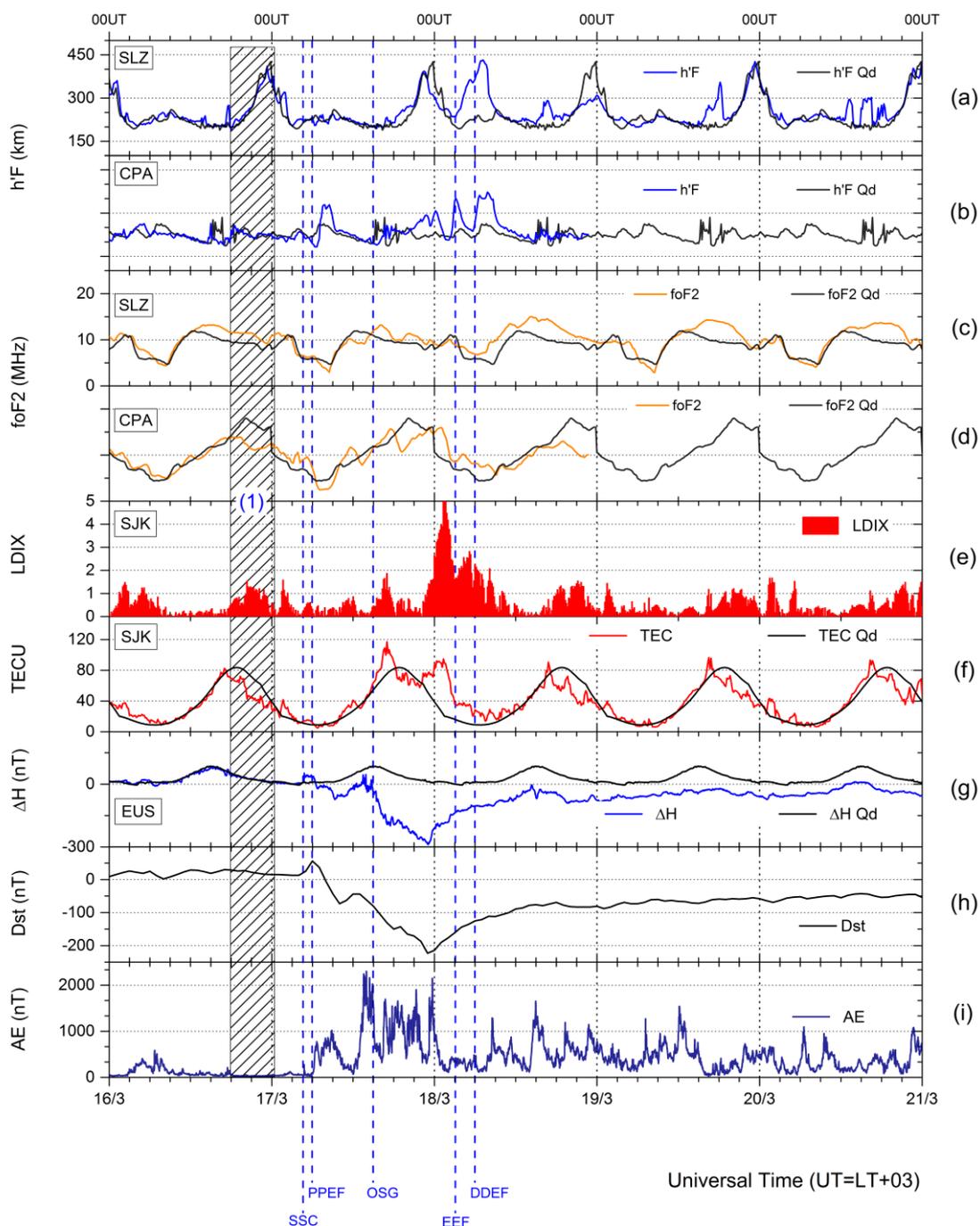


Fonte: Adaptado de Astafyeva et al. (2015)

A variação temporal dos parâmetros ionosféricos $h'F$ e $foF2$ sobre a região de (respectivamente, 'a' e 'c') São Luís (SLZ, 2,53°S, 44,30°O) e de (respectivamente, 'b' e 'd') Cachoeira Paulista (CPA, 22,4°S, 44,5°O) durante o período de 16 a 21 de março de 2015 é apresentada nos gráficos da Figura 6.2. Os valores calmos de referência para os parâmetros $h'F$ (linhas azuis) e

foF2 (linhas laranja) estão superpostos nos respectivos gráficos desta medida e são indicados pelo sufixo Qd (Quiet day). Esses valores calmos de referência (linhas pretas) foram obtidos dos mesmos dados de ionogramas, porém coletados ao longo do dia mais calmo do período (14 de março). Nesta figura, também são apresentadas as variações temporais do (e) índice LDIX e do (f) TEC correspondente. Estes dois últimos referem-se à Estação Virtual de São José dos Campos (SJK, 23,2°S, 45,8°O). Junto ao gráfico contendo a variação temporal do TEC para o período de estudo, está superposta a variação temporal do valor calmo de referência (14 de março) replicada para todos os dias do período (TEC Qd). Nos gráficos identificados pelas letras 'g', 'h', e 'i' estão apresentadas as variações do parâmetro ΔH (variações das correntes Sq) para Eusébio (EUS, 3,55°S, 38,27°O) e a evolução temporal dos índices geomagnéticos Dst e AE, respectivamente. As linhas verticais identificam horários específicos nos quais esta análise se concentra.

Figura 6.2 - Variação temporal (gráficos de 'a' a 'd') dos parâmetros de ionossonda, (e) do LDIX, (f) do TEC, (g) do parâmetro ΔH , e dos índices geomagnéticos (h) Dst e (i) AE, obtidos durante a tempestade geomagnética de St. Patrick.



Fonte: Produção do autor.

No presente caso, verifica-se que uma CME atingiu a magnetosfera terrestre às 04:45h UT do dia 17 de março de 2015 (ASTAFYEVA et al., 2015; VENKATESH et al., 2017), provocando a compressão das linhas de campo magnético terrestre, que pode ser identificada nesta figura pelo aumento súbito do índice Dst (linha 'SSC'). Observa-se também um aumento no parâmetro ΔH , ressaltando o início súbito da tempestade. No dia anterior ao SSC (16 de março), devido à grande similaridade entre as curvas dos parâmetros de ionossonda apresentados nos gráficos de 'a' a 'd', observa-se que a ionosfera se comportou de forma semelhante ao esperado durante períodos calmos, exceto pelo comportamento observado na área hachurada '1', na qual pode-se observar uma diminuição no valor do foF2 e do TEC sobre as estações CPA e SJK, respectivamente. Essa alteração no valor do TEC com relação ao período calmo de referência fez com que o índice LDIX apresentasse uma intensificação no mesmo horário. Esta perturbação leve na ionosfera de baixas latitudes pode ser ocasionada por efeitos pré-tempestades, conforme descrito em Danilov (2013) e observado em Nogueira et al. (2011). Analogamente, durante o período pré-tempestade, o índice LDIX não extrapolou os níveis iniciais. Durante o dia 16 do período de estudo, o LDIX permaneceu a maior parte do tempo dentro da classificação determinada como "calma" e, ocasionalmente, elevou-se gradativamente à condição de "levemente perturbado" (vide Tabela 4.1). Adicionalmente, estas gradativas elevações observadas no índice LDIX são condizentes com desvios observados no comportamento do parâmetro foF2 sob a região de abrangência do LDIX (próximo a SJK, i.e., CPA) nos mesmos horários (entre 18:00h e 24:00h UT do dia 16 de março), conforme demonstrado no gráfico 'd' (área hachurada 1). Com relação aos demais parâmetros ionosféricos (h'F e foF2 para SLZ), no mesmo período de interesse (entre 18:00h e 24:00h UT do dia 16 de março) não observaram-se perturbações, evidenciando que não houve penetração de campos elétricos e, por isso, trata-se de uma perturbação localizada. Em suma, verifica-se que o LDIX segue o comportamento dos parâmetros da ionossonda sobre a região em torno de SJK nos períodos que antecedem às tempestades magnéticas. Portanto, o LDIX apresenta a característica de ser um índice local,

visto que o mesmo comportamento não é observado quando comparado com as variações ionosféricas registradas em SLZ.

Ainda sobre este caso, no dia 17 de março observam-se no índice AE perturbações aurorais caracterizadas por uma sequência de subtempestades. Durante o SSC, observou-se que o ΔH também apresentou uma variação súbita. Nesse contexto, às 06:00h UT pode-se observar um aumento no parâmetro AE, seguido imediatamente por uma diminuição no parâmetro ΔH e uma redução na altura de base da camada em Cachoeira Paulista, caracterizando um PPEF penetrando para oeste (linha 'PPEF'). No entanto, durante essa penetração não houve alterações significativas no TEC, e, conseqüentemente, no LDIX. Em seguida, às 15:00h UT do dia 17, pode-se observar uma súbita diminuição do índice AE, que foi igualmente acompanhada por uma diminuição do parâmetro ΔH . Tal comportamento evidencia a ocorrência um campo elétrico do tipo *overshielding*, penetrando para oeste (linha 'OSG'). Dessa forma, observou-se às 15:00h UT uma intensificação no TEC, ocasionando um aumento no índice LDIX. Este aumento ressaltou a perturbação ionosférica produzida em decorrência da tempestade ionosférica positiva. O aumento das 15:00h UT também pode ser observado no parâmetro foF2 para ambas as localidades, SLZ e CPA. Ressalta-se, ainda, que das 15:00h UT até ~21:00h UT o parâmetro ΔH apresentou uma diminuição acentuada e quase que contínua, demonstrando que o campo elétrico *overshielding* é predominantemente para oeste. É interessante observar que durante esse período (15:00h – 21:00h) o TEC diminuiu seu valor, aproximando-se do valor calmo de referência. Essa diminuição do TEC em SJK durante um período com campo elétrico predominantemente para oeste pode indicar que houve uma supressão do efeito fonte, diminuindo o plasma em SJK devido aos efeitos de transporte.

Em seguida, o índice Dst continua diminuindo gradativamente, até atingir -223 nT durante a fase principal da tempestade (~23:00h), como se pode observar no gráfico 'h'. Ressalta-se que próximo às 21:00h UT a altura de base da camada em SLZ eleva-se, caracterizada pelo pico pré-reversão da deriva vertical do plasma, intensificando assim o efeito de transporte do plasma e

gerando um aumento do TEC em SJK das 00:00h até as 03:00h UT do dia 18 de março. Em decorrência desse aumento, observou-se um aumento do LDIX que atinge gradativamente o valor 5, representando a ocorrência de uma perturbação ionosférica intensa, que pode ocasionar sérios efeitos nos posicionamentos precisos e nas telecomunicações. Nesse mesmo horário, observa-se que o parâmetro foF2 também aumenta, indicando que o índice LDIX representa de forma coerente perturbações tanto no TEC quando no parâmetro de frequência crítica da camada F2 localizada. Adicionalmente, ressalta-se que o tempo de transporte do plasma da região equatorial é estimado em 3 horas (ABDU, 2005), provocando a intensificação do TEC próximo de 00:00h sobre São José dos Campos.

É importante ressaltar que a partir das 03:00h UT do dia 18 de março, a atividade geomagnética intensa prolongou-se por aproximadamente 24 horas. Nesse contexto, observa-se que o parâmetro h'F para SLZ apresenta um súbito aumento próximo das 03:00h UT (dia 18 de março), caracterizando um campo elétrico para leste no período noturno (linha 'EEF'). No entanto, observa-se pelo índice AE que a atividade auroral nesse momento era próxima de zero. Contudo, devido ao aquecimento auroral prolongado, possivelmente deu-se origem ao sistema de correntes do dínamo perturbado. Este processo é caracterizado por um campo elétrico do tipo DDEF penetrando para leste próximo de 06:00h UT (03:00h LT, linha 'DDEF') (BLANC e RISHMOND, 1980; RISHBETH, 2003; ABDU, 2006; FEJER et al., 2007). Em seguida, observa-se que entre 03:00h e 05:00h UT há um aumento no h'F seguido por uma descida, caracterizando o efeito de dínamo perturbado. Verifica-se que o índice LDIX passa a variar entre os valores 3 e 2, relativos a perturbações moderadas. Pelo exposto, ressalta-se que o índice LDIX também é capaz de detectar perturbações referentes ao dínamo perturbado.

Próximo do anoitecer do dia 18 para o dia 19 de março, verifica-se que a base da camada F em SLZ durante o dia geomagneticamente perturbado encontra-se em alturas inferiores com relação ao dia de referência. Isso demonstra que o pico pré-reversão da deriva vertical na região equatorial é significativamente inibido. Como consequência disso, o efeito fonte é reduzido, diminuindo a

densidade ionosférica próximo das cristas da EIA. No entanto, não foram identificadas perturbações significativas no LDIX, devido à sua característica localizada. Adicionalmente, ressalta-se que a crista da EIA, durante períodos não perturbados, não ocorre sobre São José dos Campos (NOGUEIRA, 2013).

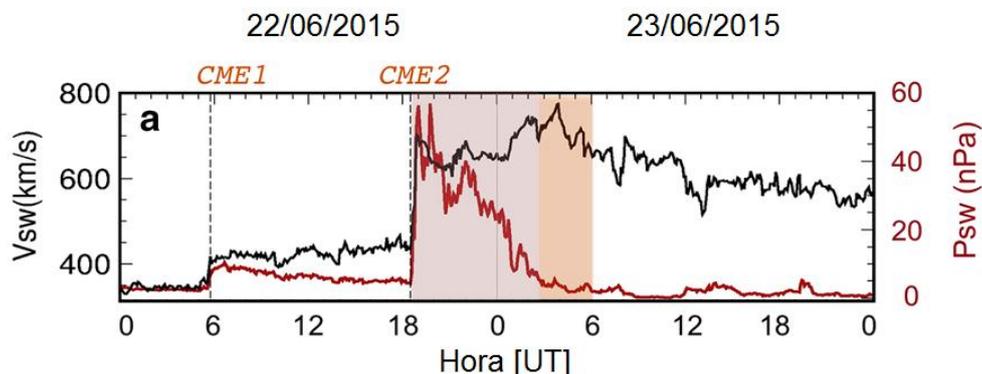
6.2 Análise para a tempestade geomagnética de 22 de junho de 2015

A tempestade geomagnética do dia 22 de junho de 2015 foi considerada a segunda mais forte do ciclo solar 24. Nesse contexto, observou-se um valor mínimo de -204 nT no índice Dst durante a fase principal da tempestade, enquanto que o índice AE apresentou valores acima de 1500 nT. Assim sendo, diversos estudos sobre a tempestade geomagnética do dia 22 de junho de 2015 têm sido feitos com o intuito de investigar os efeitos na ionosfera em várias faixas de latitude (ASTAFYEVA et al., 2016; SINGH e SRIPATHI, 2017; MAURYA et al., 2018).

O início súbito da tempestade geomagnética foi registrado às 05:45h UT do dia 22 de junho de 2015. Nesse contexto, duas CMEs atingiram a magnetosfera terrestre às 05:45h UT e às 18:30h UT, respectivamente (ASTAFYEVA et al., 2016). A ejeção das CMEs ocorreu durante os dias 18 e 10 de junho de 2015, estando relacionada a explosões solares provenientes da mancha solar AR2317 (LIU et al., 2015; ASTAFYEVA et al., 2017).

Na Figura 6.3, apresentam-se os registros gráficos da variação de velocidade (V_{sw} , linha preta) e pressão (P_{sw} , linha marrom) do vento solar durante os dias 22 e 23 de junho de 2015. Neste registro, observa-se um rápido aumento na velocidade e na pressão do vento solar às 05:45h UT do dia 22, horário de impacto da primeira CME (CME1). Ainda neste contexto, observa-se o impacto da segunda CME (CME2) próximo às 18:00h UT do dia 23 de junho, fazendo com que a velocidade do vento solar aumente de 450 para 700 km/s.

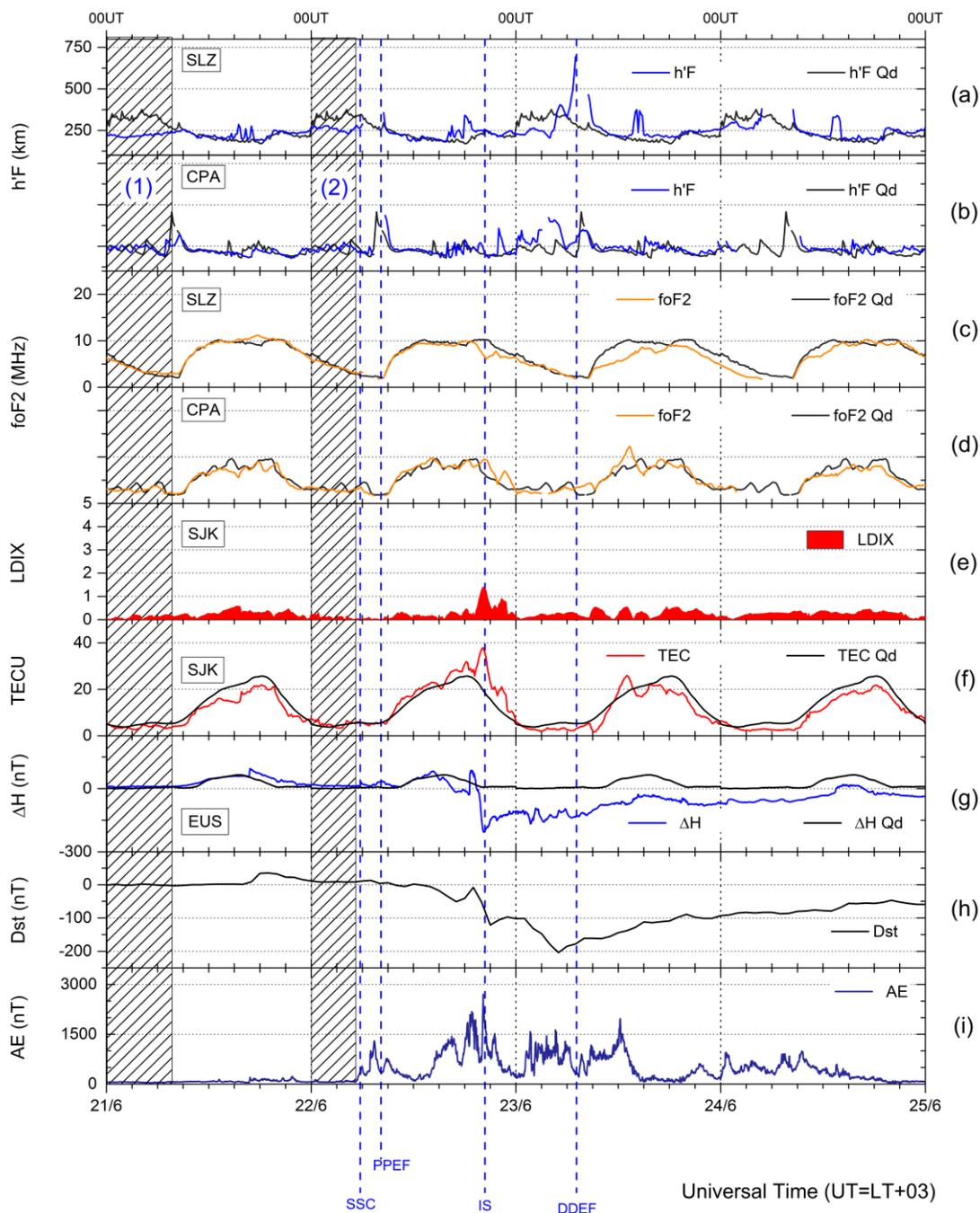
Figura 6.3 - Variações de velocidade e pressão do vento solar durante os dias 22 e 23 de junho de 2015.



Fonte: Adaptado de Astafyeva et al. (2016)

Na Figura 6.4, apresenta-se a variação temporal dos parâmetros ionosféricos $h'F$ e $foF2$ sobre a região de (respectivamente, 'a' e 'c') São Luís (SLZ, 2,53°S, 44,30°O) e de (respectivamente, "b" e "d") Cachoeira Paulista (CPA, 22,4°S, 44,5°O) durante o período de 21 a 25 de junho de 2015. Os valores calmos de referência para os parâmetros $h'F$ (linhas azuis) e $foF2$ (linhas laranja) estão superpostos nos respectivos gráficos desta medida e são indicados pelo sufixo Qd (Quiet day). Esses valores calmos de referência (linhas pretas) foram obtidos dos mesmos dados de ionogramas, porém coletados ao longo do dia mais calmo do período (20 de junho). Nesta figura, também são apresentadas as variações temporais do (e) índice LDIX e do (f) TEC correspondente. Estes dois últimos referem-se à Estação Virtual de São José dos Campos (SJK, 23,2°S, 45,8°O). Junto ao gráfico contendo a variação temporal do TEC para o período de estudo, está superposta a variação temporal do valor calmo de referência (20 de junho) replicada para todos os dias do período (TEC Qd). Nos gráficos identificados pelas letras 'g', 'h', e 'i' estão apresentadas as variações do parâmetro ΔH (variações das correntes Sq) para Eusébio (EUS, 3,55°S, 38,27°O) e a evolução temporal dos índices geomagnéticos Dst e AE, respectivamente. As linhas verticais identificam horários específicos nos quais esta análise se concentra.

Figura 6.4 - Variação temporal (gráficos de 'a' a 'd') dos parâmetros de ionossonda, (e) do LDIX, (f) do TEC, (g) do parâmetro ΔH , e dos índices geomagnéticos (h) Dst e (i) AE, obtidos durante a tempestade geomagnética 22 de junho de 2015.



Fonte: Produção do autor.

No presente caso, verifica-se que duas CMEs atingiram a magnetosfera terrestre às 05:45h UT e 18:00h UT, respectivamente, durante o dia 22 de junho de 2015 (ASTAFYEVA et al., 2016). O impacto das CMEs provocou a compressão das linhas de campo magnético terrestre, e também ocasionou uma tempestade geomagnética extrema, cujo início está identificado no gráfico 'h' pela linha 'SSC'. Durante o dia anterior à ocorrência da tempestade geomagnética, observaram-se pequenas variações no índice LDIX dentro da classificação de 'ionosfera calma', com valores abaixo de 1. Nesse contexto, observa-se que essas gradativas variações observadas no LDIX são condizentes com desvios observados no comportamento do parâmetro foF2 sob a região de abrangência do LDIX (próximo a SJK, i.e., CPA) nos mesmos horários (entre 12:00h e 21:00h UT do dia 21 de junho), conforme demonstrado no gráfico 'd', assim como no parâmetro foF2 para CPA. No entanto, tais variações não representaram perturbações ionosféricas, visto que o índice LDIX se manteve abaixo de 1, descrevendo o comportamento típico de períodos geomagneticamente calmos. Adicionalmente, observa-se que o parâmetro h'F identificou variações na altura da camada em SLZ entre 00:00h e 06:00h UT nos dia 21 e 22 (áreas hachuradas 1 e 2). Ressalta-se que os ionogramas apresentaram camadas esporádicas nesses horários, o que pode gerar erros na determinação adequada do h'F. Ainda nesse contexto, o mesmo comportamento não foi observado nos parâmetros de ionossonda para CPA e no LDIX, o que reforça a característica deste representar um índice ionosférico local.

Durante o dia 22 de junho, após o início da tempestade (~08:00h UT) observa-se um aumento concomitante nos valores do índice AE e do parâmetro h'F de CPA. Esse aumento pode estar possivelmente associado a um campo elétrico de penetração direta no sentido leste (linha 'PPEF'). Contudo, observa-se que o LDIX se mantém abaixo de 1. Ressalta-se que Astafyeva et al. (2015) verificaram que os efeitos mais intensos desta tempestade foram observados no hemisfério Norte, na região ionosférica de altas latitudes. Nesse contexto, não foram observadas perturbações imediatas no índice LDIX. Ainda durante o dia 22, observa-se a ocorrência de uma tempestade ionosférica positiva

próximo das 18:00h UT, ocasionando perturbações leves que foram identificadas pelo LDIX (linha 'IS'), que apresentou variações de ordem 1. Ressalta-se que esta tempestade ionosférica positiva ocorreu devido à intensificação do efeito fonte em São Luís, como pode ser visto pela diminuição do foF2 dessa região provocando um aumento no transporte de plasma da região equatorial para baixas latitudes (ABDU, 2005).

Durante o dia 23 de junho, observou-se um aumento súbito no h'F de SLZ, seguido por uma rápida descida. Esse comportamento está possivelmente relacionado à presença de um campo elétrico do dínamo perturbado (linha 'DDEF'). No entanto, não são observadas perturbações no índice LDIX, atestando que tais processos não afetaram a ionosfera sobre São José dos Campos (baixas latitudes) de forma intensa, conforme descrito em Astafyeva et al. (2015).

7 ESTUDO FENOMENOLÓGICO DAS VARIAÇÕES OBSERVADAS NO LDIX DURANTE UM PERÍODO GEOMAGNETICAMENTE CALMO

Este capítulo é dedicado a apresentar os resultados do estudo fenomenológico das variações observadas no índice LDIX durante períodos geomagneticamente calmos. Nesse contexto, a análise foi realizada com base em um período calmo previamente selecionado para o ano de 2015. Dessa forma, foram utilizados dados de TEC obtidos dos TECMAPs do Programa Embrace/INPE. Também foram utilizados dados do índice geomagnético Kp com o intuito de definir os dias geomagneticamente calmos e, assim, classificar as variações no TEC de acordo com a sua origem. Adicionalmente, foram utilizados ionogramas da ionosonda localizada em Cachoeira Paulista, bem como os mapas de TEC obtidos para os períodos analisados nos ionogramas.

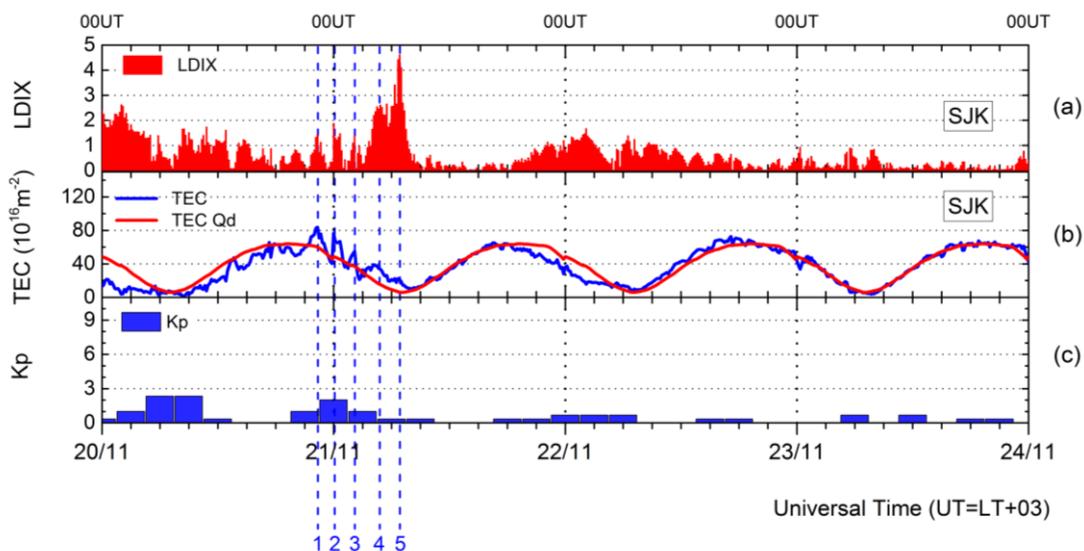
Nesse contexto, ressalta-se que mesmo durante períodos geomagneticamente calmos a ionosfera equatorial e de baixas latitudes pode apresentar variabilidade significativa. Esse comportamento pode ser caracterizado principalmente pela ocorrência de fenômenos característicos, como o Spread-F e a EIA. Conseqüentemente, esses fenômenos podem modificar a densidade e a distribuição do plasma na ionosfera, ocasionando efeitos danosos em sistemas de posicionamento e telecomunicação (e.g. cintilação ionosférica).

Dessa forma, serão apresentados os resultados de um estudo de caso da observação de perturbações ionosféricas no LDIX durante períodos geomagneticamente calmos. Para isso, selecionou-se como exemplo um dos casos já apresentados e discutidos no Capítulo 5: o período de 20 a 24 de novembro de 2015. Adicionalmente, os resultados serão discutidos em termos dos fenômenos causadores das variações observadas nos parâmetros já conhecidos na literatura científica, em contraste com as variações observadas no LDIX.

7.1 Análise para o período de 20 a 24 de novembro de 2015

Na Figura 7.1, apresenta-se a variação temporal do índice LDIX para São José dos Campos durante o período de 20 a 24 de novembro de 2015 (gráfico representado pela linha a). Nos gráficos subsequentes desta figura, também são apresentados o (b) TEC para a Estação Virtual SJK, bem como seu respectivo valor calmo de referência, e (c) a variação temporal do índice Kp durante o período de estudo. Adicionalmente, estão incluídas linhas verticais demarcando horários específicos nos quais esta análise se concentra (linhas de 1 a 5). Ressalta-se que as linhas dizem respeito aos eventos que aqui serão referidos como: Evento 1, Evento 2, Evento 3, Evento 4 e Evento 5.

Figura 7.1 - Variação temporal dos índices (a) LDIX, juntamente com (c) o TEC e seus valores calmos de referência, acompanhado (d) dos valores do índice Kp durante o período de 20 a 24 de novembro de 2015. As linhas azuis verticais representam os Eventos numerados de 1 a 5.



Fonte: Produção do autor.

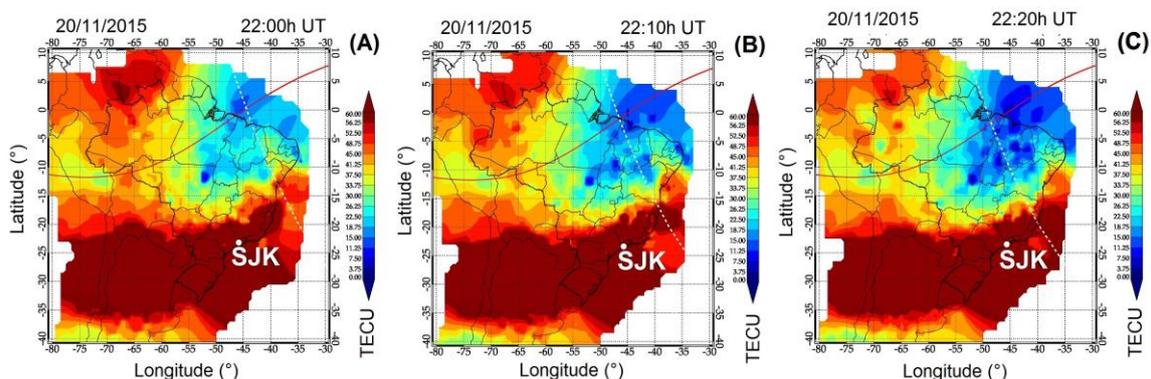
Ao longo do período de 20 a 24 de novembro de 2015, os valores do índice Kp mantiveram-se abaixo de 3. Portanto, de acordo com Wrenn et al. (1987), este período é considerado geomagneticamente calmo. Adicionalmente, devido à variação temporal do índice Kp observada nesta figura, verifica-se que o dia

mais calmo do período é representado pelo dia 23 de novembro. Diante desta condição geomagneticamente calma, os dados de TEC para a estação virtual SJK apresentaram variações da ordem de 5-35 TECU durante todo o período. Com relação à evolução temporal de curta escala no TEC, observam-se variações positivas e negativas durante todo o período. No entanto, este estudo se concentrará nas variações observadas durante os dias 20 e 21, aqui tratadas como Eventos de '1' a '5'.

Durante o dia 20 de novembro, observa-se na Figura 7.1 próximo das 22:10h UT uma variação da ordem de 25 TECU na curva do TEC (gráfico 'b'). Em decorrência desta variação, verifica-se no índice LDIX uma perturbação de ordem 1, a qual será denominada Evento 1. Verifica-se, ainda, que esta perturbação ocorre de forma gradativa, atingindo seu valor máximo por volta das 22:10h UT.

Na Figura 7.2, apresentam-se mapas de TEC obtidos próximo ao horário de ocorrência do Evento 1. Nestes mapas, observa-se a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante os seguintes horários: (mapa A) 22:00h, (mapa B) 22:10h e (mapa C) 22:20h UT, representando o período de ocorrência do Evento 1. Ainda nesta figura, identifica-se a localização geográfica de São José dos Campos (SJK).

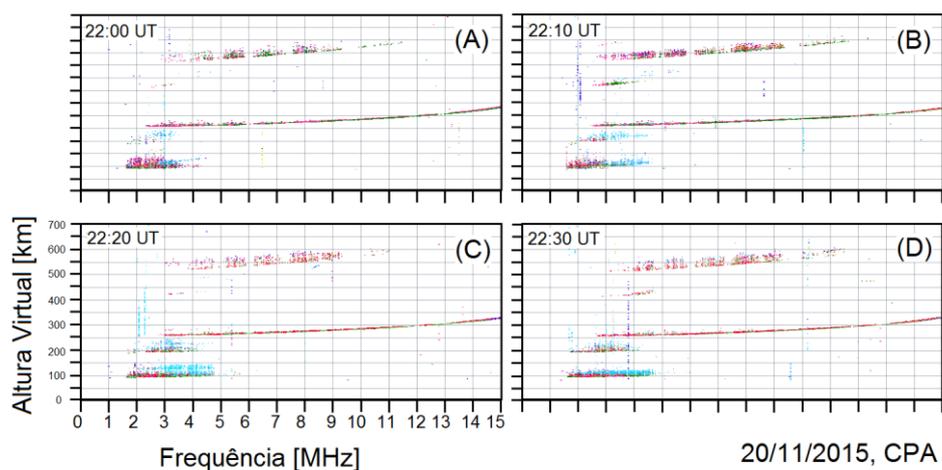
Figura 7.2 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 1.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 7.3, apresenta-se uma seqüência de quatro ionogramas obtidos a partir de uma ionossonda localizada no município de Cachoeira Paulista (CPA, 22,4°S, 44,5°O). Os ionogramas foram obtidos no intervalo entre 22:00h UT e 22:30h UT, durante o dia 20 de novembro de 2015, período que abrange a ocorrência do Evento 1.

Figura 7.3 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 22:00h UT e 22:30h UT do dia 20 de novembro de 2015.



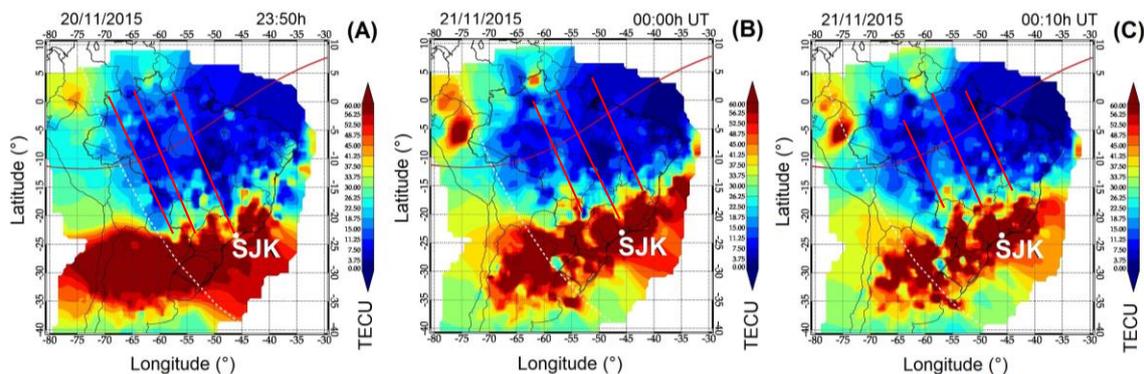
Fonte: Produção do autor.

Diante dos mapas apresentados na Figura 7.2, observa-se a ocorrência assinatura da EIA sobre SJK durante os horários que compreendem o Evento 1. Dessa forma, associa-se, a princípio, o aumento observado no LDIX durante o Evento 1 ao processo de transporte do plasma da EIA para a região sobre São José dos Campos, ocasionando uma variação positiva no TEC da ordem de 25 TECU. Com relação à evolução temporal da ionosfera obtida a partir dos ionogramas, não foi observada a ocorrência de fenômenos do tipo Spread-F. Nesse contexto, atribui-se o Evento 1 ao transporte de plasma da EIA, detectado pelo LDIX em SJK.

Durante o dia 21 de novembro, observa-se na Figura 7.1 próximo das 23:50h UT uma variação da ordem de 30 TECU na curva do TEC (gráfico 'b'). Em decorrência desta variação, verifica-se uma perturbação no índice LDIX de ordem 1, a qual será denominada Evento 2. Verifica-se, ainda, que esta perturbação ocorre de forma gradativa, atingindo seu valor máximo por volta das 00:00h UT.

Na Figura 7.4, apresentam-se mapas de TEC obtidos próximo ao horário de ocorrência do Evento 2. Nestes mapas, observa-se a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante os seguintes horários: (mapa A) 23:50h, (mapa B) 00:00h e (mapa C) 00:10h UT. Ainda nesta figura, identifica-se a localização geográfica de São José dos Campos (SJK). Adicionalmente, as linhas vermelhas indicam a ocorrência de irregularidades ionosféricas observadas nos mapas de TEC.

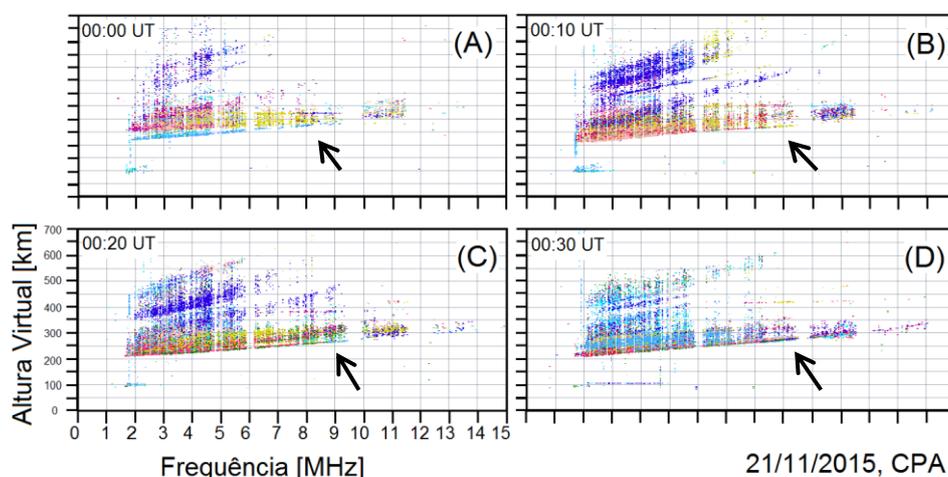
Figura 7.4 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 2. As linhas vermelhas indicam a ocorrência de irregularidades ionosféricas próximo ao equador magnético.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 7.5, apresenta-se uma sequência de quatro ionogramas obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA. Estes ionogramas foram obtidos durante o intervalo entre 00:00h UT e 00:30h UT, no dia 21 de novembro de 2015, período que abrange a ocorrência do Evento 2. As setas indicam a ocorrência do fenômeno Spread-F.

Figura 7.5 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 22:00h UT e 22:30h UT do dia 20 de novembro de 2015. As setas indicam a ocorrência de Spread-F.



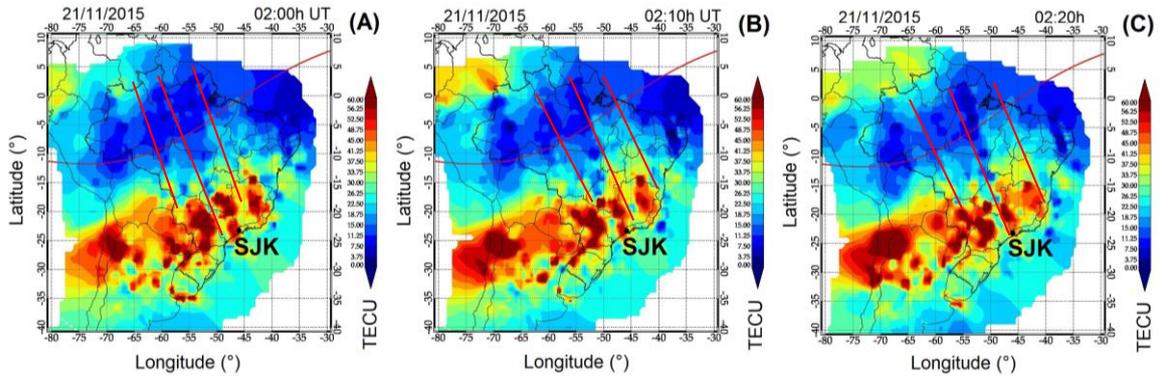
Fonte: Produção do autor.

Diante dos mapas de TEC, observam-se irregularidades no plasma sobre São José dos Campos, indicadas pelas linhas vermelhas. Como pode ser visto no mapa 'A', a ionosfera próximo a SJK passa a ser mais rarefeita perto das 23:50h UT. As linhas vermelhas indicam as regiões onde a densidade do TEC diminui. Dessa forma, associa-se, a princípio, o aumento observado no LDIX durante o Evento 2 às irregularidades ionosféricas observadas nos mapas de TEC da Figura 7.4. Com relação aos ionogramas apresentados na Figura 7.5, observa-se a ocorrência de fenômenos do tipo Spread-F possivelmente relacionados a bolhas de plasma (irregularidades observadas nos mapas de TEC). Com base neste resultado, verifica-se que o índice LDIX está apto a detectar a resposta ionosférica devida à ocorrência de bolhas de plasma. Ressalta-se que as bolhas de plasma podem causar diversos problemas de funcionamento nos sistemas de posicionamento e navegação, ocasionando erros e até mesmo a perda total de comunicação (JAKOWSKI et al., 2006, 2012; MONICO, 2008).

Ainda com relação ao dia 21 de novembro, observa-se na Figura 7.1 próximo das 02:00h UT uma variação da ordem de 20 TECU na curva do TEC (gráfico 'b'). Em decorrência desta variação, verifica-se uma perturbação no índice LDIX de ordem 1, a qual será denominada Evento 3. Verifica-se, ainda, que esta perturbação ocorre de forma gradativa, atingindo seu valor máximo por volta das 02:20h UT.

Na Figura 7.6, apresentam-se mapas de TEC obtidos próximo ao horário de ocorrência do Evento 3. Nestes mapas, observa-se a evolução temporal do TEC sobre a América do Sul durante os seguintes horários: (mapa A) 02:00h, (mapa B) 02:10h e (mapa C) 02:20h UT. Ainda nesta figura, identifica-se a localização geográfica de São José dos Campos (SJK). Adicionalmente, as linhas vermelhas indicam a ocorrência de irregularidades ionosféricas observadas nos mapas de TEC.

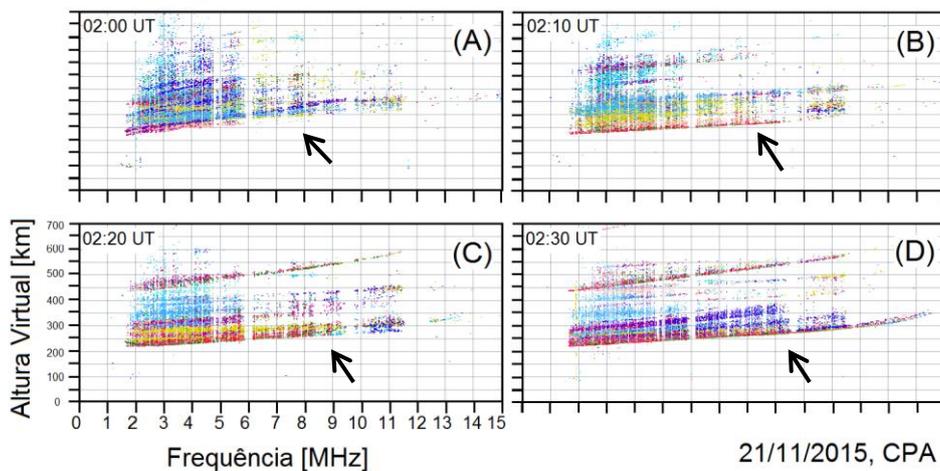
Figura 7.6 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 3. As linhas vermelhas indicam a ocorrência de irregularidades ionosféricas próximo ao equador magnético.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 7.7, apresenta-se uma sequência de quatro ionogramas obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA. Estes ionogramas foram obtidos durante o intervalo entre 02:00h UT e 02:30h UT, no dia 21 de novembro de 2015, período que abrange a ocorrência do Evento 3. As setas indicam a ocorrência do fenômeno Spread-F.

Figura 7.7 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 02:00h UT e 02:30h UT do dia 21 de novembro de 2015. As setas indicam a ocorrência de Spread-F.



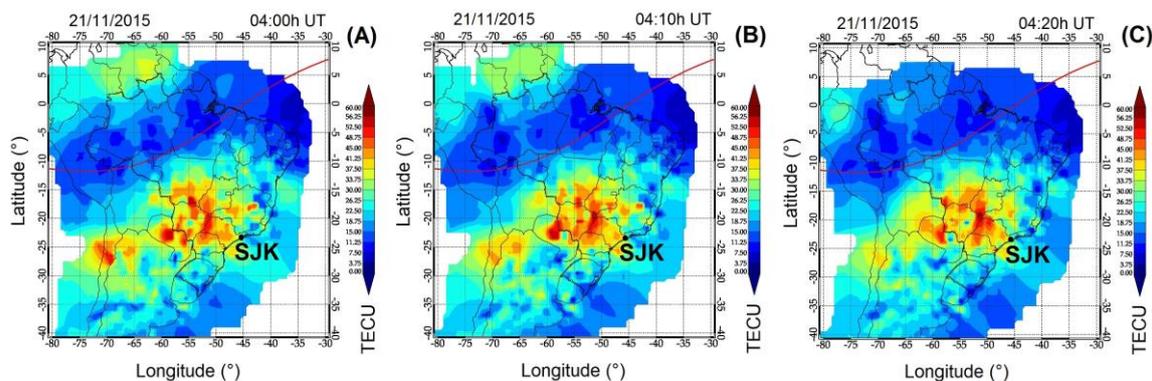
Fonte: Produção do autor.

Diante dos mapas de TEC, observa-se o desenvolvimento de irregularidades no plasma sobre São José dos Campos. Como pode ser visto no mapa 'A', a ionosfera sobre SJK passa a ser mais rarefeita próximo das 02:00h UT. As linhas vermelhas indicam as regiões onde a densidade do TEC apresenta depleções. Dessa forma, associa-se, a princípio, o aumento observado no LDIX durante o Evento 3 às irregularidades ionosféricas observadas nos mapas de TEC da Figura 7.6. Com relação aos ionogramas apresentados na Figura 7.7, observa-se claramente a ocorrência do espalhamento relacionado a fenômenos do tipo Spread-F. Estas ocorrências estão possivelmente relacionadas ao desenvolvimento de bolhas de plasma (irregularidades observadas nos mapas de TEC). Com base neste resultado, verifica-se que o índice LDIX está apto a detectar a resposta ionosférica devida a bolhas de plasma.

A respeito do aumento identificado no TEC próximo das 04:00h UT do dia 21 de novembro, observa-se uma variação da ordem de 25 TECU (Figura 7.1, gráfico 'b'). Em decorrência desta variação, verifica-se uma perturbação no índice LDIX de ordem 2 (perturbação moderada), a qual será denominada Evento 4.

Na Figura 7.8, apresentam-se mapas de TEC obtidos próximo ao horário de ocorrência do Evento 4. Nestes mapas, observa-se a evolução temporal do TEC sobre a América do Sul durante os seguintes horários: (mapa A) 04:00h, (mapa B) 04:10h e (mapa C) 04:20h UT. Ainda nesta figura, identifica-se a localização geográfica de São José dos Campos (SJK).

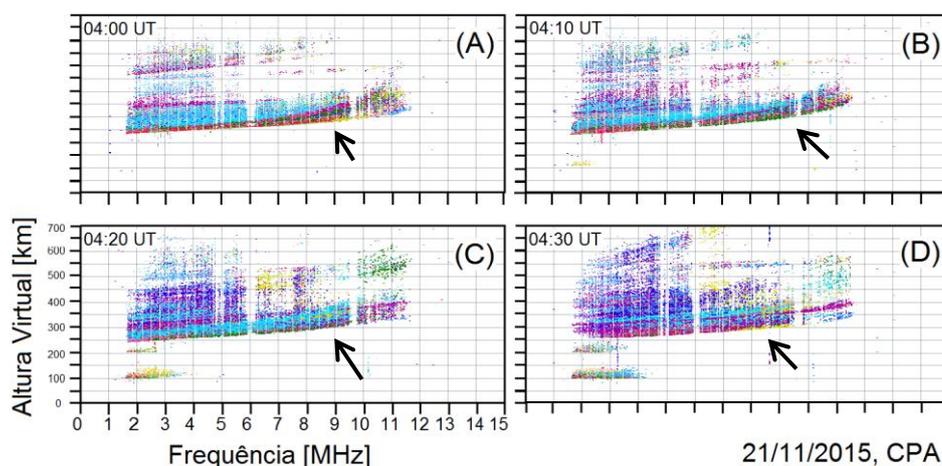
Figura 7.8 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 4.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 7.9, apresenta-se uma seqüência de quatro ionogramas obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA. Estes ionogramas foram obtidos durante o intervalo entre 04:00h UT e 04:30h UT, no dia 21 de novembro de 2015, período que abrange a ocorrência do Evento 4. As setas indicam a ocorrência do fenômeno Spread-F.

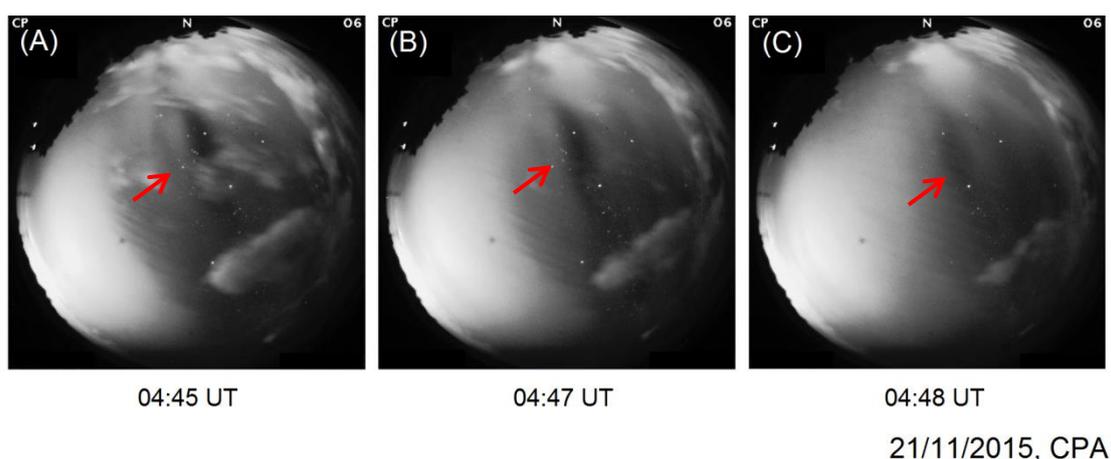
Figura 7.9 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 04:00h UT e 04:30h UT do dia 21 de novembro de 2015. As setas indicam a ocorrência de Spread-F.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 7.10, apresenta-se uma sequência de três imagens de emissão de OI 630,0 nm, obtidas a partir de um imageador do tipo 'All Sky' instalado em CPA. Estas imagens foram obtidas durante o intervalo entre 04:45h UT e 04:48h UT, no dia 21 de novembro de 2015, período imediatamente posterior ao intervalo de tempo que abrange o pico do LDIX observado no Evento 4, juntamente com o Spread-F observado neste mesmo intervalo a partir da sequência de ionogramas. As setas vermelhas indicam a ocorrência de bolhas de plasma.

Figura 7.10 - Bolha de plasma registrada pelo imageador localizado em Cachoeira Paulista, em 21/11/2015. As setas vermelhas indicam as regiões de depleção do plasma relacionadas a bolhas.



Fonte: Produção do autor.

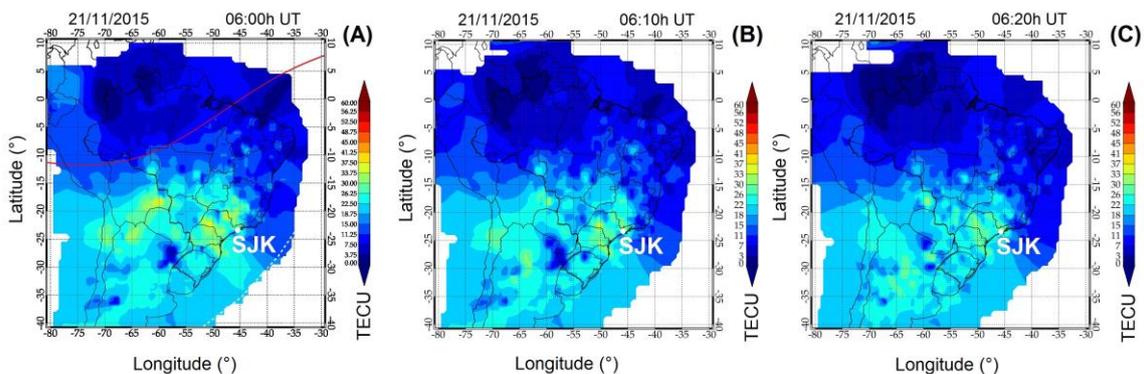
Diante dos mapas de TEC da Figura 7.8, observa-se o desenvolvimento de pequenas irregularidades no plasma sobre São José dos Campos. No entanto, não é possível observar o desenvolvimento de depleções de plasma com clareza sobre o equador magnético, como observado nos casos anteriores. Com relação aos ionogramas apresentados na Figura 7.9, observa-se a ocorrência do Spread-F durante o período de abrangência do Evento 4. Estas ocorrências estão possivelmente relacionadas ao desenvolvimento de irregularidades ionosféricas. A confirmação da ocorrência de bolhas de plasma

pode ser obtida a partir dos resultados apresentados na Figura 7.10, na qual observa-se a ocorrência de uma bolha de plasma na ionosfera próxima a São José dos Campos, a partir do comportamento característico da emissão do OI 630,0 nm, indicadas pelas setas vermelhas.

O Evento 5 é caracterizado pela ocorrência de uma variação da ordem de 28 TECU no TEC (Figura 7.1, gráfico 'b') durante o dia 20 de novembro, observada próximo das 06:00h UT. Em decorrência desta variação, verifica-se uma perturbação no índice LDIX de ordem 4 (perturbação intensa), a qual será denominada Evento 5.

Na Figura 7.11, apresentam-se mapas de TEC obtidos próximo ao horário de ocorrência do Evento 5. Nestes mapas, observa-se a evolução temporal do TEC sobre a América do Sul durante os seguintes horários: (mapa A) 06:00h, (mapa B) 06:10h e (mapa C) 06:20h UT. Ainda nesta figura, identifica-se a localização geográfica de São José dos Campos (SJK).

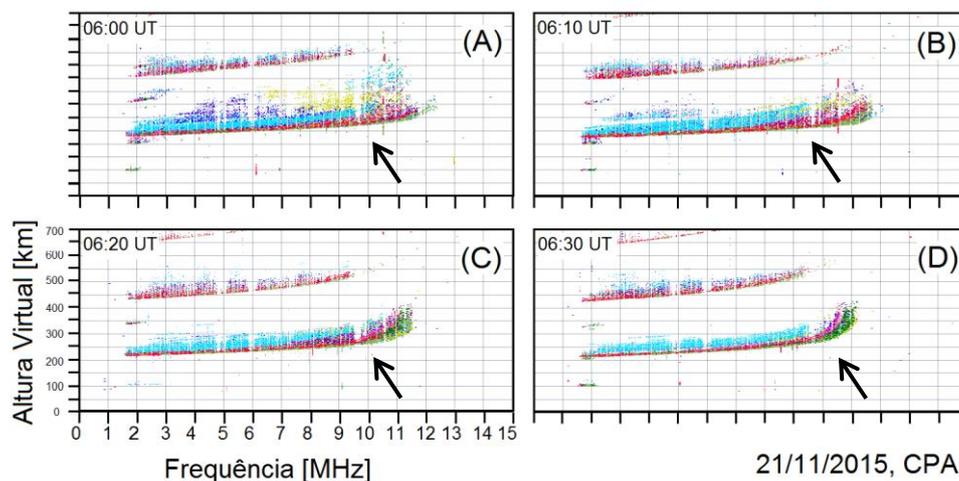
Figura 7.11 - Mapas demonstrando a evolução temporal do TEC sobre a Região Brasileira durante o período que abrange o Evento 5.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 7.12, apresenta-se uma sequência de quatro ionogramas obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA. Estes ionogramas foram obtidos durante o intervalo entre 06:00h UT e 06:30h UT, no dia 21 de novembro de 2015, período que abrange a ocorrência do Evento 5. As setas indicam a ocorrência do fenômeno Spread-F.

Figura 7.12 - Sequência de ionogramas demonstrando a frequência de reflexão variando com a altura virtual da camada, obtidos a partir da ionossonda localizada em CPA, no intervalo entre 06:00h UT e 06:30h UT do dia 21 de novembro de 2015. As setas indicam a evolução temporal da ocorrência do Spread-F.



Fonte: Produção do autor.

Com relação aos mapas de TEC apresentados na Figura 7.11, observa-se o desenvolvimento de pequenas irregularidades do plasma na região sobre São José dos Campos. No entanto, não é possível observar o desenvolvimento de depleções de plasma com clareza sobre o equador magnético, como observado nos casos anteriores. Com relação aos ionogramas apresentados na Figura 7.12, observa-se a ocorrência do Spread-F durante o período de abrangência do Evento 5. Este comportamento está possivelmente relacionado ao desenvolvimento das irregularidades observadas nos mapas de TEC. Contudo, verifica-se que o espalhamento ocorre de forma menos intensa do que nos outros casos apresentados anteriormente. No entanto, observou-se que o índice LDIX apresenta valor acima de 4. Neste contexto, ressalta-se que o LDIX não corresponde a um índice de irregularidades/bolhas de plasma, variando conforme as alterações na ionosfera de forma geral.

Com base nesta análise, verificou-se que o índice LDIX detectou as respostas ionosféricas ocasionadas por irregularidades ionosféricas observadas nos mapas de TEC, bem como as ocorrências do Spread-F observadas nos

ionogramas, posteriormente atribuídas à ocorrência de bolhas de plasma. Tal comportamento indica uma forte relação entre os processos físicos detectados pelo LDIX e os processos relacionados às bolhas de plasma, um fenômeno que pode afetar seriamente o funcionamento de sistemas de posicionamento e navegação (e.g. GPS, GLONASS).

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho está inserido em um contexto de desenvolvimento de ferramentas científico-computacionais para a análise de dados de geofísica espacial. Dessa forma, desenvolveu-se uma ferramenta científica com o intuito de coletar um conjunto de dados novos, permitindo à comunidade obter uma visão melhor e/ou mais completa sobre a fenomenologia de seu interesse.

Dentro desse contexto, foram realizados diversos estudos a partir de dados de TEC e parâmetros de ionossonda, com o intuito de desenvolver e validar a técnica proposta. Dentre as análises, foram efetuados estudos sobre as variações observadas no comportamento local da ionosfera. Os resultados foram discutidos em termos das respostas observadas no índice LDIX durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados, os quais estão listados no capítulo 5 deste trabalho. Adicionalmente, foram analisados e comparados os resultados do LDIX com relação a dois métodos diferentes de obtenção do TEC. Dessa forma, buscou-se caracterizar a neutralidade do índice LDIX com relação à sua fonte de dados, estabelecendo-o como um parâmetro de fácil aplicação. Também foram realizados estudos de caso do comportamento do LDIX comparado à variação de parâmetros já bem conhecidos na comunidade científica, tais como os índices AE, Dst e Kp, assim como os parâmetros ΔH , foF2 e h'F.

8.1 Conclusões

Com relação aos resultados referentes às análises das variações no comportamento local da ionosfera, em termos das respostas observadas no índice LDIX durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados, listam-se as conclusões:

- (a) O índice LDIX e o índice DIX apresentaram pequenas discrepâncias pontuais na ausência de variações ionosféricas de grande amplitude;

- (b) O índice DIX apresentou limitações quanto à detecção de perturbações ionosféricas de caráter diurno. Em contrapartida, o índice LDIX foi capaz de detectar tais perturbações;
- (c) O índice DIX apresentou discrepâncias com relação ao LDIX, indicando perturbações inexistentes no TEC. Essas variações foram classificadas como falsos positivos;
- (d) Não foram observadas discrepâncias significativas no LDIX calculado a partir de duas fontes de dados diferentes: o TEC obtido dos TECMAPs do Programa Embrace/INPE e o TEC obtido a partir da técnica INPE;
- (e) Verificou-se uma forte relação entre os processos físicos observados no parâmetro foF2 e as perturbações observadas no LDIX, o que constata a significância física do LDIX;
- (f) O índice DIX não apresentou a mesma similaridade física observada no LDIX com relação ao parâmetro foF2;
- (g) O índice LDIX representa o comportamento local da ionosfera, sendo considerado um índice localizado;
- (h) O índice LDIX foi capaz de detectar a resposta ionosférica devida à ocorrência de bolhas de plasma de forma localizada;
- (i) O índice LDIX foi capaz de detectar a resposta ionosférica de campos elétricos do tipo *overshielding* de forma localizada;
- (j) O índice LDIX foi capaz de detectar a resposta ionosférica dos campos elétricos do dínamo perturbado (DDEF) de forma localizada;
- (k) O índice LDIX respondeu de forma coerente aos processos de transporte de plasma originados na região equatorial.
- (l) Os dados de TEC do modelo IRI apresentaram alta dispersão com relação aos dados de TEC medidos durante dias geomagneticamente calmos. Por este motivo, o TEC do modelo IRI não está apto a representar um valor calmo de referência para o índice LDIX.

- (m) A média mensal dos dados de TEC pode incluir tanto dias geomagneticamente calmos, como dias com perturbações geomagnéticas extremas. Por este motivo, a média mensal do TEC não está apta a representar um valor calmo de referência para o índice LDIX.
- (n) Médias móveis de 1h e 3h do TEC obtido durante o dia geomagneticamente mais calmo de um determinado período apresentam bom ajuste e forte correlação com os dados de TEC obtidos durante os dias calmos do mês, referente ao mesmo período. Por este motivo, estes métodos são aptos a representar o valor calmo de referência para o índice LDIX.

8.2 Trabalhos futuros

Apesar de alcançados os objetivos propostos, certamente identificam-se novas possibilidades e limitações que podem fomentar melhorias no desenvolvimento do índice LDIX. Com a ampliação da Rede Embrace/INPE, passando a incluir um número maior de estações GNSS e a utilizar dados do sistema GLONASS para o cálculo do TEC, esta linha de pesquisa mostra-se longe de ser esgotada. Nesse contexto, uma lista dos pontos que foram identificados durante o desenvolvimento deste trabalho, e que podem ser explorados no futuro é descrita:

- Realizar um estudo de modo a buscar um método para eliminar os efeitos de borda observados na curva do valor calmo de referência do LDIX. Esses efeitos surgem à medida que um fenômeno limítrofe aumenta ou diminui o TEC, ocasionando um pico ou depleção nas bordas do padrão diário de ionização do LDIX, e estando diretamente relacionado à utilização de médias móveis;
- Deve-se estender o estudo para outras faixas latitudinais, com o intuito de verificar se o LDIX se comporta da mesma forma mediante a presença de outros fenômenos geofísicos;

- Quantificar o impacto da sazonalidade na utilização do valor calmo de referência durante períodos menores ou maiores do que 15 dias, com o intuito de melhorar a aplicabilidade do LDIX ao monitoramento ionosférico de longa escala temporal;
- Efetuar estudos comparativos no intuito de relacionar as perturbações observadas no LDIX a informações derivadas de parâmetros já bem estabelecidos e utilizados pela comunidade científica. Neste contexto, pretende-se capacitar o LDIX para a obtenção de informações sobre erros nos sistemas de posicionamento e navegação; e
- Empregar o LDIX ao cálculo do grau de perturbação da ionosfera em todas os pontos de observação da Rede Embrace/INPE , caracterizando um índice ionosférico em forma de mapa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A.; MEDEIROS, R. T.; SOBRAL, J. H. A.; BITTENCOURT, J. A. Spread-F plasma bubble vertical rise velocities determined from spaced ionosonde observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, n. 11, p. 9197-9204, 1983.

ABDU, M. A. Equatorial spread F and ionosphere–thermosphere system: a review. **Trends in Geophysics Research**, v. 2, p. 193-209, 1994.

ABDU, M. A.; MACDOUGAL, J.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A.; JAYAHANDRAN, P. T. Equatorial evening prereversal electric field enhancement and sporadic E layer disruption: a manifestation of E and F region coupling. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, 2003.

ABDU, M. A. Equatorial ionosphere–thermosphere system: electrodynamics and irregularities. **Advances in Space Research**, v. 35, p. 771–787, 2005.

ABDU, M. A.; DE SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I.S. Magnetic storm associated disturbance dynamo effects in the low and equatorial latitude ionosphere. In: TSURUTANI, B.; MCPHERRON, R.; LU, G.; SOBRAL, J. H. A.; GOPALSWAMY, N. **Recurrent magnetic storms: corotating solar wind streams**. Washington, DC: American Geophysical Union, 2006, p. 283-304.

ABDU, M. A.; BRUM, C. G. M.; BATISTA, I.S.; SOBRAL, J. H. A.; DE PAULA, E. R.; SOUZA, J. R. Solar flux effects on equatorial ionization anomaly and total electron content over Brazil: observational results versus IRI representations. **Advances in Space Research**, v. 42, p. 617-625, 2008.

ASTAFYEVA, E.; ZAKHARENKOVA, I.; FÖRSTER, M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: a global multi-instrumental overview. **Journal of Geophysical Research**, v. 120, p. 9023–9037, 2015.

ASTAFYEVA, E.; ZAKHARENKOVA, I.; ALKEN, P. Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the June 22–23, 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation. **Earth, Planets and Space**, v. 68, 2016.

ASEVEDO-JÚNIOR, W. D. **Modelo ionosférico regional parametrizado**. 2009. 81 p. (INPE-15776-TDI/1519). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009.

BALAN N.; BAILEY G.; ABDU M.; OYAMA K.; RICHARDS P.; MACDOUGALL J.; BATISTA I. Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: evidence for an additional layer, the F3 layer. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 2047-2056, 1997.

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

BARBOSA, F.; FAGUNDES, P.; VENKATESH, K.; FEJER, B.; PILLAT, V.; DENARDINI, C.; MUELLA, M. Multi-scale ionospheric irregularities occurrence over South America during the St. Patrick's day storm on March 17, 2015. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 174, p. 32-45, 2018.

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; MEDEIROS, R. T.; DE PAULA, E. R. Comparison between IRI predictions and digisonde measurements at a low latitude station. **Advances in Space Research**, v. 18, p. 49-52, 1996.

BATISTA I. S.; ABDU, M.; MACDOUGALL, J.; SOUZA J. Long term trends in the frequency of occurrence of the F3 layer over Fortaleza, Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 1409-1412, 2002.

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; BERTONI, F. C. P.; MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BAILEY, G. J. Unusual early morning development of the equatorial anomaly at the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. 1-10, 2006.

BESER, J.; DANAHER, J. The 3S navigation R-100 family of integrated GPS/GLONASS receivers: description and performance results. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 10., 1993, San Francisco, USA. **Proceedings...** San Francisco: ION, 1993. p. 25-45.

BILIBIO, A. V. **Estudo para a qualificação do Índice Geomagnético Sul-Americano KSA em comparação com o índice global KP**. 2017. 118 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.

BILITZA, D. International reference ionosphere 2000. **Radio Science**, v.36, p.261-275, 2001.

BITTENCOURT, J. A. **Física da ionosfera**. São José dos Campos: INPE, 1978. 52 p. (INPE-1191-NTE/111).

BLANC, M. E RICHMOND, A. D. The ionospheric disturbance dynamo. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, p. 1669, 1980.

CASALI, S.; ALMEIDA, O. G.; WALDMAN, H. **Cálculo do conteúdo eletrônico da ionosfera usando efeito Faraday**. São José dos Campos: CNAE, 1968. 62 p. PI (CNAE-70-LAFE).

CARMO, C. S. **Estudo de diferentes técnicas para o cálculo do Conteúdo Eletrônico Total absoluto na ionosfera equatorial e de baixas latitudes**. 2018. 149 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018.

CHASHEI, I. V.; TYUL'BASHEV, S. A.; SHISHOV, V. I.; SUBAEV, I. A. Interplanetary and ionosphere scintillation produced by ICME 20 December 2015. **Space Weather**, v. 14, p. 682–688, 2016.

CRAVENS, T. E.; VANN, J.; CLARK, J.; YU, J.; KELLER, C. N.; BRULL, C. The ionosphere of Titan: an updated theoretical model. **Advances in Space Research**, v. 33, p. 212-215, 2004.

DANILOV, A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances. **Advances in Space Research**, v. 52, p. 343–366, 2013.

DALE, S.A.; DALY, P. The Soviet Union's GLONASS navigation satellites. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, v. 2, p. 13-17, 1987.

DALY, P. Aspects of the Soviet Union's GLONASS Satellite Navigation System. **Journal of Navigation**, v. 41, p. 186-198, 1988.

DALY, P.; RILEY, S. GLONASS P-code data message. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 11., 1994, San Francisco, USA. **Proceedings...** San Francisco: ION, 1994. p. 195-202.

FAGUNDES, P. R.; CARDOSO, F. A.; FEJER, B. G.; VENKATESH, K.; RIBEIRO, B. A. G.; PILLAT, V. G. Positive and negative GPS-TEC ionospheric storm effects during the extreme space weather event of March 2015 over the Brazilian Sector. **Journal of Geophysical Research**, v. 121, p. 5613-5625, 2016.

FEDRIZZI, M. **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS**. 1999. 123 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999.

FEJER, B. G.; JENSEN, J. W.; KIKUCHI, T.; ABDU, M. A.; CHAU, J. L. Equatorial ionospheric electric fields during the November 2004 magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, 2007.

FONSECA JUNIOR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 176 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2002.

FULLER-ROWELL, T. J.; CODRESCU, M. V.; RISHBETH, H.; MOFFETT, R. J.; QUEGAN, S. On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p. 2343–2353, 1996.

GEIGER, R. L. **Research and relevant knowledge: American research universities since World War II**. New York: Oxford University Press, 1993. 447p. ISBN 07-65-80569-3.

GFZ GERMAN RESEARCH CENTRE FOR GEOSCIENCES. **Classification of days (deduced from Kp indices)**. Disponível em: <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/qd-days>. Acesso em: 20 maio 2018.

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

HAYMES, R. C. **Introduction to space science**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1971. 556 p. ISBN 04-71-36500-9.

HEGARTY, C. J. The Global Positioning System (GPS). In: TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. (Ed.). **Springer handbook of Global Navigation Satellite Systems**. New York, USA: Springer, 2017. p. 197-217.

HOBIGER, T.; JAKOWSKI, N. Atmospheric signal propagation. In: TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. (Ed.). **Springer handbook of Global Navigation Satellite Systems**. New York, USA: Springer, 2017. p. 165-190.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: theory and practice**. 3.ed. New York, USA: Springer, 1994. 382 p. ISBN 978-3-7091-6199-9.

JAKOWSKI, N. TEC monitoring by using satellite positioning systems. In: KOHL, H.; RUSTER, R.; SCHLEGEL, K. (Ed.). **Modern ionospheric science**. Katlenburg-Lindau, GER: European Geophysical Society, 1996. p. 371-390.

JAKOWSKI, N.; STANKOV, S. M.; SCHLUETER, S.; KLAEHN, D. On developing a new ionospheric perturbation index for space weather operations. **Advances in Space Research**, v. 38, p. 2596-2600, 2006.

JAKOWSKI, N.; BORRIES, C.; WILKEN, V. Introducing a disturbance ionosphere index. **Radio Science**, v. 47, 2012.

KAMIDE, Y.; YOKOYAMA, N.; GONZALEZ, W.; TSURUTANI, B. T.; DAGLIS, I.A.; BREKKE, A.; MASUDA, S. Two-step development of geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 6917-6921, 1998.

KANTOR, I. J. **Wave polarization through the ionosphere and low latitude electron content**. 1969. 120 p. PI(CNAE-97-LAFE). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1969.

KATAMZI, Z. T. **Statistical analysis of ionospheric total electron content**. 2011. 189 p. Thesis (Ph.D in Engineering) - University of Bath, Bath (UK), 2011.

KELLEY, M. C.; FEJER B. G.; GONZALES C. A. An explanation for anomalous ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field. **Geophysical Research Letters**, p. 301–304, 1979.

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. London, UK: Academic Press, 1989. 487 p. ISBN 01-24-04012-8.

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. 2.ed. London, UK: Academic Press, 2009. 576 p. ISBN 97-80-12088425-4.

KERSLEY, L.; MALAN, D.; PRYSE, S. E.; CANDER, L. R.; BAMFORD, R. A.; BELEHAKI, A.; LEITINGER, R.; RADICELLA, S. M.; MITCHELL, C. N.; SPENCER, P. S. J. Total electron content: a key parameter in propagation: measurement and use in ionospheric imaging. **Annals of Geophysics**, v. 47, 2004.

KINTNER, P. M.; COSTER, A. J.; FULLER-ROWELL, T.; MANNUCCI, A. J.; MENDILLO, M.; HEELIS, R. **Midlatitude ionospheric dynamics and disturbances**. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2008. 338 p. ISBN 08-75-90446-7.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, 1991. 149 p.

KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C. T. **Introduction to space physics**. New York, USA: Cambridge University Press, 1995. 588 p. ISBN 978052145714-9.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric effects on GPS. **GPS World**, v. 4, p. 48-51, 1991.

LEE, C. C.; CUO, Y. J.; CHU, F. D. Climatology of total electron content near the dip equator under geomagnetic quiet-conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.72, p. 207–212, 2010.

LASSITER, E. M. Navstar Global Positioning System: a satellite based microwave navigation system. In: INTERNATIONAL MICROWAVE SYMPOSIUM, 19., 1975, Palo Alto, USA. **Proceedings...** Palo Alto: IEEE, 1975.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 2 ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1995. 841 p. ISBN 9781118675571.

LENNEN, G.R. The USSR's GLONASS P-Code - Determination and initial results. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2., 1989, Colorado Springs, USA. **Proceedings...** Colorado Spring: ION, 1989. p. 77-83.

LIU, Y.; HU, H.; WANG, R.; YANG, Z.; ZHU, B.; LIU, Y.; LUHMANN, J.; RICHARDSON, J. Plasma and magnetic field characteristics of solar coronal mass ejections in relation to geomagnetic storm intensity and variability. **Astrophysical Journal Letters**, v. 809, 2015.

LOUCKS, D.; PALO, S.; PILINSKI, M.; CROWLEY, G.; AZEEM, I.; HAMPTON, D. High-latitude GPS phase scintillation from E region electron density gradients during the 20–21 December 2015 geomagnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 122, p. 7473–7490, 2017.

MAGDALENO, S.; HERRAIZ, M.; ALTADILL, D.; DE LA MORENA, B. Climatology characterization of equatorial plasma bubbles using GPS data. **Journal of Space Weather and Space Climate**, v. 7, p. A3, 2017.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção ionosférica utilizando os mapas globais de TEC do IGS: avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 13, 2007.

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.

MAURYA, A. K.; VENKATESHAM, K.; KUMAR, S.; SINGH, R.; TIWARI, P.; SINGH, A. K. Effects of St. Patrick's day geomagnetic storm of March 2015 and of June 2015 on low-Equatorial D region ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 123, p. 6836–6850, 2018.

MENZORI, M. **Georreferenciamento**: conceitos. São Paulo: Baraúna, 2017. 412 p.

MCNAMARA, L. F. **The ionosphere**: communications, surveillance, and direction finding. Malabar, USA: Krieger Publishing Company, 1991. 273 p.

MOHANTY, P. K.; ARUNBABU, K. P.; AZIZ, T.; DUGAD, S. R.; GUPTA, S. K.; HARIHARAN, B.; JAGADEESAN, P.; JAIN, A.; MORRIS, S. D.; RAO, B. S. Transient weakening of Earth's magnetic shield probed by a cosmic ray burst. **Physical Review Letters**, v. 117, 2016.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2.ed. São Paulo: UNESP, 2008. 480 p.

MORO, J. **Variações longitudinais dos campos elétricos do Eletrojato Equatorial no setor americano**. 2015. 175 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial). - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

NAVIA, C. E.; OLIVEIRA, M. N.; AUGUSTO, C. R. A. **The highest geomagnetic storms of the Solar Cycle observed at ground level**. 2018. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/extreme-weather/the-highest-geomagnetic-storms-of-the-solar-cycle-observed-at-ground-level>. Acesso em: 18 dez. 2019.

NICOLET, M. **Contribution to the study of the structure of the ionosphere**. Brussels, BE: National Aeronautics and Space Administration, 1945. 179 p.

NEGRETI, P. M. S. **Estudo do conteúdo eletrônico total na região brasileira em períodos magneticamente perturbados**. 2012. 325 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

NOGUEIRA, P. A. B.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SIQUEIRA, P. M. Equatorial ionization anomaly and thermospheric meridional winds during two major storms over Brazilian low latitudes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, p. 1535-1543, 2011.

NOGUEIRA, P. A. B. **Estudo das características do padrão de onda número 4 e variabilidades do TEC sobre a América do Sul**. 2013. 234 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013.

ODRIOZOLA, S. S. **Estudo de irregularidades do plasma ionosférico na região entre as camadas E e F no setor brasileiro a partir de medidas de foguete**. 2017. 253 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.

OTSUKA, Y.; OGAWA, T.; SAITO, A.; TSUGAWA, T.; FUKAO, S.; MIYAZAKI, S. A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan. **Journal of Earth Planets Space**, v. 54, p. 63–70, 2002.

OYA, H; TAKAHASHI, T.; WATANABE, S. Observation of low latitude ionosphere by the impedance probe on board the Hinotori satellite. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 38, 1986.

PARKER, E. N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic field. **Astrophysical Journal**, v. 128, p. 664, 1958.

PIERCE, J. A.; MCKENZIE, A. A.; WOODWARD, R. H. **LORAN: Long Range Navigation**. New York, USA: McGraw-Hill, 1948. 476 p.

PIMENTA, A. A. **Estudo da deriva zonal e dinâmica das Bolhas de plasma na região tropical**. 2002. 196 p. (INPE-9546-TDI/827). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

REVNIVYKH, S.; BOLKUNOV, A.; SERDYUKOV, A. GLONASS. In: TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. **Springer handbook of Global Navigation Satellite Systems**. New York, USA: Springer, 2017. p. 219-243.

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York, USA: Academic Press, 1969. 334 p.

RISHBETH, H. Basic physics of the ionosphere: a tutorial review. **Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers**, v. 58, p. 207-223, 1988.

RISHBETH, H. F-region storms and thermospheric dynamics. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 43, p. 513–524, 1991.

RODRIGUES, F. S. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS**. 2003. 180 p. (INPE – 15222-TDI/1315). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.

ROSTOKER, G. Geomagnetic indexes. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 10, p. 935–951, 1972.

SANTOS, J. S. **Estudo da geração das Bolhas de Plasma sob diferentes condições meteorológicas e ionosféricas**: observações e simulação. 2013. 149 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013.

SCHERLIESS, L.; FEJER, B.G. Storm time dependence of equatorial disturbance dynamo zonal electric fields. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 24.037–24.046, 1997.

SEEBER, G. **Satellite geodesy**: foundations, methods, and applications. Berlin, GER: Walter De Gruyter, 1993. 546 p. ISBN 31-10-12753-9.

SEPULVEDA, M. A. B. **Efeitos do campo elétrico e do vento neutro sobre a ionosfera equatorial e de baixas latitudes durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados**. 2015. 220 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

SINGH, R., E SRIPATHI, S. Ionospheric response to 22–23 June 2015 storm as investigated using ground-based ionosondes and GPS receivers over India. **Journal of Geophysical Research**, v. 122, p. 645–664, 2017.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI; BATISTA, I. S.; CLUA DE GONZALEZ, A. L. Effects of intense storms and substorms on the equatorial ionosphere/thermosphere system in the American sector from ground-based and satellite data. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A7, p. 14.305- 14.313, 1997.

SREEJA, V.; RAVINDRAN, S.; PANT, T. Features of the F3 layer occurrence over the equatorial location of Trivandrum. **Annales Geophysicae**, v. 28, p. 1741-1747, 2010.

SWANSON, E. R.; TIBBALS, M. L. The Omega Navigation System. **Journal of The Institute of Navigation**, v. 12, p. 24-35, 1965.

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C.; DENARDINI, C.; PÁDUA, M.; DE PAULA, E.; COSTA, S.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MONICO, J.; IVO, A.; SANT'ANNA, N. Ionospheric TEC weather map over South America. **Space Weather**, v. 14, p. 937-949, 2016.

TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. GPS observation equations and positioning concepts. In: KLEUSBERG, A.; TEUNISSEN, P. J. G. (Ed.). **GPS for geodesy**. Berlin: Springer, 1996. p. 175-217.

VALENTIM, A. M. S. **Campos elétricos e derivas do plasma na ionosfera equatorial do setor americano durante tempestades magnéticas**. 2015. 259 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

VAN-DIERENDONCK, A. J.; HEGARTY, C.J. The new L5 civil GPS signal. **GPS World**, v. 11, p. 64–72 , 2000.

VENKATESH, K.; RAM, S. T.; FAGUNDES, P. R.; SEEMALA, G. K.; BATISTA, I. S. Electrodynamic disturbances in the Brazilian equatorial and low-latitude ionosphere on St. Patrick's Day storm of 17 March 2015. **Journal of Geophysical Research**, v. 122, p. 4553–4570, 2017.

WEI, Y.; ZHAO, B.; LI, G.; WAN, W. Electric field penetration into Earth's ionosphere: a brief review for 2000–2013. **Science Bulletin**, v. 60, p. 748-761, 2015.

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.

WOLF, R. A.; SPIRO, R. W.; SAZYKIN, S; TOFFOLETO, F. R. How the Earth's inner magnetosphere works: an evolving picture. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, p. 288, 1987.

WU, C. C.; FRY, C. D.; LIU, J. Y.; LIOU, K.; TSENG, C. L. Annual TEC variation in the equatorial anomaly region during the solar minimum: September 1996–August 1997. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 199–207, 2004.

WU, C. C.; LIOU, K.; LEPPING, R. P.; HUTTING, L.; PLUNKETT, S.; HOWARD, R. S.; SOCKER, D. The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: “The St. Patrick’s day event (17 March 2015)”. **Earth, Planets and Space**, v. 68, p. 151-163, 2016.

YAMASHITA, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na Ionosfera de baixa latitude**. 1999. 72 p. (INPE-7516-TDI/729). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999.

