



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/12.01.19.24-TDI

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE PERTURBAÇÕES IONOSFÉRICAS ASSOCIADAS A EVENTOS DE BOLHAS DE PLASMA UTILIZANDO ÍNDICES IONOSFÉRICOS E DADOS OBSERVACIONAIS

Giorgio Arlan da Silva Picanço

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Paulo Alexandre Bronzato Nogueira, e Clezio Marcos De Nardin, aprovada em 21 de novembro de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4AAK8TL>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
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 INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/12.01.19.24-TDI

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE PERTURBAÇÕES IONOSFÉRICAS ASSOCIADAS A EVENTOS DE BOLHAS DE PLASMA UTILIZANDO ÍNDICES IONOSFÉRICOS E DADOS OBSERVACIONAIS

Giorgio Arlan da Silva Picanço

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Paulo Alexandre Bronzato Nogueira, e Clezio Marcos De Nardin, aprovada em 21 de novembro de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4AAK8TL>>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Picanço, Giorgio Arlan da Silva.

Pi58e Estudo e caracterização de perturbações ionosféricas associadas a eventos de bolhas de plasma utilizando índices ionosféricos e dados observacionais / Giorgio Arlan da Silva Picanço. – São José dos Campos : INPE, 2023.

xxxiv + 171 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/12.01.19.24-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

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

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

CDU 550.388:523.9



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE TESE DE GIORGIO ARLAN DA SILVA PICANÇO
REG. 142565/2019, BANCA Nº 267/2023

No dia 21 de novembro de 2023, de forma virtual, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Geofísica Espacial / Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Título: Estudo e caracterização de perturbações ionosféricas associadas a eventos de bolhas de plasma utilizando índices ionosféricos e dados observacionais

Membros da banca:

Dr. Cristiano Max Wrasse – Presidente – INPE
Dr. Paulo Alexandre Bronzato Nogueira – Orientador – IFSP
Dr. Odim Mendes Junior – Membro Interno – INPE
Dr. Hisao Takahashi – Membro Interno – INPE
Dra. Amalia Margarita Meza – Membro Externo – UNLP
Dr. Marcio Tadeu de Assis Honorato Muella – Membro Externo – UNIVAP

Declaração de aprovação de Amalia Margarita Meza anexa ao processo.



Documento assinado eletronicamente por **MARCIO TADEU DE ASSIS HONORATO MUELLA (E), Usuário Externo**, em 23/11/2023, às 09:28 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Odin Mendes Júnior, Pesquisador**, em 23/11/2023, às 10:28 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Max Wrasse, Pesquisador**, em 23/11/2023, às 11:41 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo alexandre bronzato nogueira (E), Usuário Externo**, em 23/11/2023, às 17:30 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **hisao takahashi (E), Usuário Externo**, em 23/11/2023, às 21:24 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11519765** e o código CRC **EE48B724**.

Referência: Processo nº 01340.009552/2023-90

SEI nº 11519765

“Uma bela viagem deu-te Ítaca. / Sem ela não te porias a caminho. / Mais do que isso não lhe cumpre dar-te. / Ítaca não te iludiu, se a achas pobre. / Tu te tornaste sábio, um homem de experiência, / e agora sabes o que significam Ítacas.”

Konstantinos Kaváfis em “Ítaca” (1911)

Dedicado à minha amada família, cujo esforço ao longo das gerações me permitiu ter a oportunidade de chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus ser meu refúgio e dar-me paz de espírito durante os longos anos desta jornada incansável em busca do conhecimento.

Aos meus pais, Nilza e Kildare, por todos os ensinamentos e valores que direcionaram o meu caráter e minha trajetória profissional desde quando saí de casa para perseguir meus sonhos e objetivos.

À pessoa que está ao meu lado em todos os momentos, sem jamais permitir que eu ouse duvidar da minha capacidade. Com você, sei que posso conquistar tudo o que sempre sonhei. Fernanda, meu amor!

Ao meu orientador, Dr. Clezio Marcos De Nardin, que tem liderado pelo exemplo o direcionamento da minha trajetória acadêmica. Mais do que um orientador de doutorado, você tem sido meu mentor e grande amigo. Sou muito grato a você por mostrar-me as variáveis ocultas na complexa equação do êxito científico.

Ao meu orientador, Dr. Paulo Alexandre Bronzato Nogueira, agradeço todo o tempo dispensado ao desenvolvimento desta pesquisa, a amizade e os conhecimentos compartilhados. É um privilégio poder trabalhar com um cientista tão virtuoso.

À minha amiga e grande incentivadora, Dra. Laysa Resende, agradeço toda a ajuda, colaboração, conselhos e ter sido uma irmã desde que cheguei a São José dos Campos. Serei eternamente grato por todo o seu apoio!

Aos Drs. Amalia Meza, M. Paula Natali e Luciano Mendoza, da Universidad Nacional de La Plata (UNLP), que me receberam e orientaram durante os 7 meses que passei na Argentina para o Doutorado Sanduíche. Agradeço também a todos os integrantes do grupo MAGGIA todo o apoio que recebi durante esse importante momento da minha trajetória acadêmica. A todos os amigos que fiz na Argentina, *¡muchísimas gracias!*

Ao Dr. Marcelo Banik, cuja valiosa ajuda foi essencial para conseguir processar a grande quantidade de dados GNSS utilizados neste trabalho no tempo necessário para o desenvolvimento da tese.

Ao Me. Luiz Phillip Vital, pela ajuda com o cálculo dos meridianos magnéticos utilizando o modelo IGRF-13 e com a programação em Python. Obrigado!

Ao Dr. Diego Barros, agradeço a ajuda com a metodologia de interpolação de dados ionosféricos utilizada neste trabalho.

Ao Dr. Ronan Chagas, agradeço a ajuda com o desenvolvimento matemático para o cálculo das efemérides dos satélites GNSS.

À Professora Inez Batista, por contribuir com suas observações durante a análise da variabilidade das perturbações ionosféricas.

Ao Dr. Toyese Tunde, pela ajuda com o modelo de ventos termosféricos utilizado nesta pesquisa.

À Dra. Carolina Carmo, pela ajuda com a equação do índice ROTI utilizada na validação apresentada neste trabalho.

Aos membros da banca avaliadora, por aceitarem avaliar esta tese e pelas valiosas contribuições que tenho recebido desde o mestrado.

Às seguintes instituições, por disponibilizarem os dados GNSS utilizados neste trabalho: IBGE (Brasil), IGN (Argentina), SGM (Uruguai), LISN (Peru), UNAVCO (EUA), NASA (EUA), BKG (Alemanha) e IGS (Internacional).

Ao Programa Embrace/INPE por disponibilizar os dados de ionossonda e Imageador All-Sky utilizados neste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), agradeço a oportunidade de desenvolver este trabalho em uma instituição de tamanha excelência. Agradeço a todos os professores da pós-graduação em Geofísica Espacial as excelentes disciplinas ministradas. Agradeço também a todos os amigos que compartilharam comigo bons momentos durante esse período.

Ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e à Agência Espacial Brasileira (AEB), agradeço o suporte à pesquisa realizada no INPE em São José dos Campos.

Agradeço a todos que me apoiaram em algum momento da minha trajetória acadêmica. Aqui deixo meus sinceros agradecimentos aos Drs. Julio Tota e Raphael Di Carlo pelo apoio e incentivo durante as graduações em Ciências da Terra e Geofísica. Obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se um estudo sobre a variabilidade morfológica das bolhas de plasma (EPBs, do inglês *Equatorial Plasma Bubbles*) na ionosfera sobre a região da América Latina, tendo como foco períodos geomagneticamente calmos nos ciclos solares 24 e 25. Nesse contexto, as EPBs são regiões de notável redução na densidade do plasma ionosférico, as quais têm sua origem na região equatorial e se difundem em ambos os hemisférios ao longo das linhas de campo geomagnético. Para a realização deste estudo, foram utilizados dados do índice de perturbação da ionosfera (DIX, do inglês *Disturbance Ionosphere index*) com o intuito de analisar as perturbações do plasma ionosférico associadas às EPBs e examinar as possíveis influências da atividade solar e parâmetros magnéticos (e.g. inclinação, declinação) sobre o controle morfológico desses fenômenos. Assim sendo, desenvolveu-se uma metodologia para a detecção e parametrização automáticas das perturbações ionosféricas associadas às EPBs. Esta metodologia foi aplicada a um conjunto de dados de aproximadamente 450 estações GNSS (do inglês *Global Navigation Satellite System*) localizadas na América Latina, totalizando 1164 noites com a ocorrência de bolhas no período entre 2015 e 2023. Os resultados deste estudo destacam a influência da atividade solar, do setor longitudinal e da declinação magnética sobre as características morfológicas das EPBs, bem como seu comportamento sazonal. Assim, observou-se que o desenvolvimento latitudinal e a amplitude de depleção das EPBs variam de acordo com o fluxo solar, principalmente devido à variabilidade da deriva vertical do plasma associada aos dínamos ionosféricos. No entanto, identificou-se um ponto de saturação no desenvolvimento das EPBs mediante a ocorrência de níveis elevados de fluxo solar. A saturação no desenvolvimento das EPBs apresentou variações significativas de acordo com o setor longitudinal e a declinação magnética, sendo notável que o ponto de saturação ocorre com maior facilidade em direção ao setor longitudinal da costa leste da América Latina. Por outro lado, observou-se que as EPBs apresentam um desenvolvimento mais pronunciado na costa leste em comparação com a costa oeste, o que pode estar diretamente relacionado à maior concentração de plasma e à declinação magnética do setor leste. Esta última, por sua vez, revelou-se um importante mecanismo de controle na variação sazonal das EPBs. Também foram observadas assimetrias inter-hemisféricas no desenvolvimento latitudinal das EPBs, as quais foram mais significativas em setores com menor declinação magnética, sendo atribuídas principalmente à variabilidade dos ventos termosféricos transequatoriais. Finalmente, desenvolveu-se um modelo empírico para a estimativa da extensão latitudinal máxima das EPBs com base no fluxo solar e na declinação magnética. Esse modelo mostrou-se uma ferramenta importante para proporcionar informações sobre a estimativa do desenvolvimento das EPBs em diferentes etapas do ciclo solar e em diferentes setores longitudinais.

Palavras-chave: Bolhas de plasma. DIX. Ionosfera terrestre. Perturbações ionosféricas. Ciclo solar.

STUDY AND CHARACTERIZATION OF IONOSPHERIC DISTURBANCES ASSOCIATED WITH PLASMA BUBBLE EVENTS USING IONOSPHERIC INDICES AND OBSERVATIONAL DATA

ABSTRACT

In this work, we present a study on the morphological variability of equatorial plasma bubbles (EPBs) in the ionosphere over the Latin American region, focusing on geomagnetically quiet periods during solar cycles 24 and 25. In this context, EPBs are regions of significant reduction in ionospheric plasma density, originating in the equatorial region and spreading across both hemispheres along geomagnetic field lines. To perform this study, we used data from the Disturbance Ionosphere index (DIX) to analyze plasma disturbances associated with EPBs and examine the potential influences of solar activity and magnetic parameters on the morphological control of these phenomena (e.g., inclination, declination). Thus, we developed a methodology for the automatic detection and parameterization of ionospheric disturbances associated with EPBs. Then, we applied this methodology to a dataset from approximately 450 Global Navigation Satellite System (GNSS) stations located in Latin America, totaling 1164 nights with the occurrence of bubbles, between 2015 and 2023. The results of this study highlight the influence of solar activity, longitudinal sector, and magnetic declination on the morphological characteristics of EPBs, as well as their seasonal behavior. We observed that the latitudinal development and depletion amplitude of EPB varies with solar flux, primarily due to the variability of vertical plasma drift associated with ionospheric dynamos. However, we identified a saturation point in the EPB development within high solar levels. The saturation in EPB development exhibited significant variations according to longitudinal sector and magnetic declination, with the saturation point more easily reached in the longitudinal sector of the Latin America east coast. On the other hand, EPBs exhibited more pronounced development on the eastern coast in comparison to the western coast, which may be directly related to higher plasma concentration and the magnetic declination of the east sector. The magnetic declination, in turn, proved to be a significant control mechanism in the seasonal variation of EPBs. We also observed inter-hemispheric asymmetries in the EPB latitudinal development, which were more pronounced in sectors with lower magnetic declination and primarily attributed to the variability of trans-equatorial thermospheric winds. Finally, we developed an empirical model to estimate the maximum latitudinal extent of EPBs based on solar flux and magnetic declination. This model proved to be an important tool for providing information on the development of EPBs at different stages of the solar cycle and in different longitudinal sectors.

Keywords: Equatorial Plasma Bubbles. DIX. Earth's ionosphere. Ionospheric disturbances. Solar cycle.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Exemplo de comparação entre emissões simuladas (A, B) e observadas (C) do OI-135,6 nm utilizando dados do modelo SAMI3/WACCM-X e do satélite GOLD. 7	7
Figura 2.2 - Modelo simplificado do mecanismo de formação do pico pré-reversão. 10	10
Figura 2.3 - Ilustração do mecanismo de formação da Instabilidade Rayleigh-Taylor.. 12	12
Figura 2.4 - Etapas da formação de bolhas de plasma na ionosfera equatorial. 14	14
Figura 2.5 - Ilustração sequencial da evolução da Instabilidade Rayleigh-Taylor na ionosfera..... 14	14
Figura 2.6 - Classificação das irregularidades ionosféricas de acordo com a sua extensão latitudinal..... 15	15
Figura 2.7 - Variação anual da extensão latitudinal (a) e frequência de ocorrência (b) em função de latitudes e alturas de Apex das EPBs, considerando o período entre 21 de novembro de 2012 e 31 de janeiro de 2016, para a América do Sul. 17	17
Figura 2.8 - Mapas de TEC sobre a América do Sul em (A) 08/03/2015 às 23:40 UT e em (B) 09/03/2015 às 01:40 UT..... 18	18
Figura 2.9 - Média mensal da ocorrência de EPBs entre janeiro de 2012 e fevereiro de 2016 na Região Brasileira..... 20	20
Figura 2.10 - Gráficos da variação da velocidade de deriva vertical da Região F em função da hora local. A: Resultados de Fejer et al. (1991). B: Resultados de Batista et al. (1996). C: Resultados de Abdu et al. (1981)..... 22	22
Figura 2.11 - Gráficos de contorno de densidade eletrônica e condutividade Pedersen em um plano de latitude (°) versus altitude (km) para um cenário sem ventos meridionais (A e B) e com ventos meridionais de 60 m/s (C e D)..... 25	25
Figura 2.12 - Sequência de ionogramas obtidos a partir de dados da ionossonda localizada em Fortaleza (FZA0M, -3,71°S, -38,54°O), entre 21:00 UT e 22:20 UT do dia 02 de fevereiro de 2004. As setas pretas indicam a presença de espalhamento (Spread-F) nos pulsos transmitidos pela ionossonda..... 27	27
Figura 2.13 - Exemplos de imagens sem (A) e com (B) a presença de EPBs, obtidas utilizando o ASI localizado em São João do Cariri (CA, -7,39°S, -36,53°O) entre 24 e 25 de dezembro de 2013. As setas vermelhas indicam assinaturas de EPBs. 28	28

Figura 2.14 - Exemplos de assinaturas de EPBs observadas usando diferentes técnicas e instrumentos: ionossonda (A), ASI (B), mapa do índice DIX (C), radar VHF (D), mapa de TEC (E) e mapas do índice ROTI (F). As setas vermelhas em cada um dos painéis indicam a ocorrência de EPBs.	31
Figura 3.1 - Ilustração dos satélites da constelação GPS: Bloco IIA (topo esquerdo), Bloco IIR (topo direito), Bloco IIF (inferior esquerdo), e GPS III (inferior direito).	37
Figura 3.2 - Representação esquemática das órbitas LEO, MEO e GEO ao redor da Terra.....	37
Figura 3.3 - Esquema ilustrando a distribuição de satélites GPS (símbolos azuis) dentro de quatro slots de cada plano orbital.	38
Figura 3.4 - Mapa das trajetórias terrestres dos satélites da constelação GPS durante as 24 horas do dia 01/09/2015. Os planos orbitais são representados por cores distintas (preto: A, vermelho: B, verde: C, azul: D, laranja: E, violeta: F).	39
Figura 3.5 - Ilustração dos satélites da constelação GLONASS: Série I (a), Série M (b), Série K1 (c), e Série K2 (d).	41
Figura 3.6 - Planos orbitais e posições dos satélites da constelação GLONASS.....	42
Figura 3.7 - Trajetórias terrestres dos satélites da constelação GLONASS. Cada linha de cor diferente representa um dos três planos orbitais.....	43
Figura 3.8 - Ilustração de um dos satélites FOC utilizados no sistema Galileo.	46
Figura 3.9 - Planos orbitais e <i>slots</i> da constelação de satélites Galileo.....	47
Figura 3.10 - Trajetórias terrestres dos satélites Galileo no período entre 21/06/2018 e 30/06/2018.....	48
Figura 3.11 - Satélites (a) GEO e (b) MEO/IGSO do sistema BeiDou.	50
Figura 3.12 - Mapa das trajetórias terrestres dos satélites GEO ('G', em vermelho), IGSO ('I', em azul) e MEO ('M', em verde) da constelação BeiDou.....	51
Figura 4.1 - Ilustração do modelo ionosférico de camada unitária.	59
Figura 4.2 - Posição de um satélite no sistema de referência ECEF.	61
Figura 4.3 - Evolução temporal das posições geográficas do IPP para satélites GNSS na América Latina ao longo de um período de 24 horas.....	66
Figura 4.4 - Exemplo de detecção de saltos de ciclo nas medidas de fase do sistema GPS utilizando a combinação MW. Painel esquerdo: variação temporal do ϕ_6 calculado utilizando as observáveis L e C do satélite G18 para a estação BELE em 18/02/2015.	

Painel direito: desvio padrão amostral de ϕ_6 apresentando um cycle slip próximo às 00:18 UT (linha vertical pontilhada).	71
Figura 4.5 - Exemplo da aplicação da combinação IF para remoção de outliers nas observáveis L e C do satélite G02 (estação BELE, 18/02/2015). Painel esquerdo: combinação IF para a observável L. Painel direito: combinação IF para a observável C. Em ambos os gráficos, a área destacada em amarelo representa os limites do ajuste polinomial, e os pontos fora dessa região representam os <i>outliers</i>	73
Figura 4.6 - Variação temporal do VTEC para a estação BELE em 18/02/2015.....	77
Figura 4.7 - Variação temporal do STEC para a estação BELE em 18/02/2015.	78
Figura 5.1 - Comparação entre os gráficos de variação temporal dos índices DIX (barras em vermelho) e ROTI (pontos em preto) para as estações PBCG (painel ‘A’), PBJP (painel ‘C’) e PEAFF (painel ‘D’), juntamente com as trajetórias do IPP (painéis B, D e F) sobre as estações terrestres (símbolos em vermelho), ao longo do dia 12/02/2016.....	86
Figura 5.2 - Comparação entre os gráficos de variação temporal dos índices DIX (barras em vermelho) e ROTI (pontos em preto) para as estações MGIN (painel ‘A’), SJSP (painel ‘C’) e UBA1 (painel ‘D’), juntamente com as trajetórias do IPP (painéis B, D e F) sobre as estações terrestres (símbolos em vermelho), ao longo do dia 12/02/2016.....	87
Figura 5.3 - Sequência de ionogramas obtidos utilizando dados da ionossonda localizada em Fortaleza (FZA0M), em 12/02/2016. As setas pretas indicam horários específicos em que foi observada a ocorrência de Spread-F no sinal transmitido.	90
Figura 5.4 - Sequência de ionogramas obtidos utilizando dados da ionossonda localizada em Cachoeira Paulista (CAJ2M), em 12/02/2016. As setas pretas indicam horários com a ocorrência de Spread-F.....	90
Figura 5.5 - Imagens obtidas utilizando o ASI instalado em São João do Cariri (CA) em 12/02/16. As setas vermelhas destacam regiões com a presença de bolhas de plasma. .	91
Figura 5.6 - Imagens obtidas utilizando o ASI instalado em Cachoeira Paulista (CP) em 12/02/16. As setas vermelhas indicam a ocorrência de bolhas de plasma.	92
Figura 5.7 - Distribuição geográfica das estações disponíveis em função da compatibilidade do receptor GNSS.	94

Figura 5.8 - Metodologia para determinação do domínio do índice DIX. Painel esquerdo (A): mapa da matriz de recorte. Painel direito (B): mapa da matriz de recorte com extensão de 500 km.	95
Figura 5.9 - Sequência de DIXMAPs obtidos para o dia 31/03/2016, no período de 22:50 UT (A) a 23:40 UT (F). A linha em vermelho representa as coordenadas do equador magnético em março de 2016.....	97
Figura 5.10 - Sequência de DIXMAPs obtidos para o dia 16/03/2015, no período de 02:50 UT (A) a 03:40 UT (F). A linha em vermelho representa as coordenadas do equador magnético em março de 2015.....	98
Figura 5.11 - Coordenadas geográficas dos meridianos oeste (1), central (2) e leste (3) em 15/01/2015. A linha vermelha representa as coordenadas geográficas do equador magnético. Os símbolos coloridos representam os valores de declinação magnética em cada um dos pontos dos meridianos.	100
Figura 5.12 - Keogramas de DIX dos meridianos oeste (A), central (B) e leste (C), no período de 17 a 19 de janeiro de 2015. As linhas vermelhas tracejadas representam as latitudes do equador magnético em cada meridiano. Cada quadrante representa o período noturno de cada dia (18:00 – 06:00), em hora local.	102
Figura 5.13 - Exemplo de keograma meridional de DIX (painel ‘A’), o qual é utilizado para obter o keograma binário (painel ‘B’) e detectar as bordas das perturbações ionosféricas (linhas em azul). Destacam-se as coordenadas das feições perturbadas utilizadas para calcular o intervalo de ocorrência (t_1 e t_2) e a extensão em latitude (y_1 e y_2) das perturbações ionosféricas associadas a EPBs (painel ‘C’). Adicionalmente, é exibido o keograma meridional demarcado com os limites das perturbações (linhas em vermelho, painel ‘D’). A linha preta tracejada representa a latitude geográfica do equador magnético no meridiano.	105
Figura 5.14 - Variação temporal da extensão em latitude (painel ‘A’) e comprimento estimado (painel ‘B’) das perturbações ionosféricas associadas a EPBs durante o mês de janeiro de 2015 ao longo do meridiano oeste. A linha vermelha representa a latitude geográfica do equador magnético no meridiano.....	107
Figura 5.15 - Variação temporal do coeficiente de assimetria inter-hemisférica no meridiano oeste em janeiro de 2015.	108

Figura 6.1 - Médias anuais dos valores máximos de DIX registrados durante eventos de EPBs em pontos conjugados com inclinação magnética de 0° (linhas vermelhas), 10° (linhas azuis) e -10° (linhas verdes), obtidos nos meridianos oeste (painel ‘A’), central (painel ‘B’) e leste (painel ‘C’), entre 2015 e 2023. As barras na cor cinza representam as médias anuais do índice F10.7 durante o mesmo período. 112

Figura 6.2 - Gráficos de dispersão que ilustram a relação entre as taxas de variação percentual das médias anuais do F10.7 e do DIX durante EPBs em relação ao mínimo solar ocorrido entre os ciclos solares 24 e 25, para os meridianos oeste (A), central (B) e leste (C). As linhas verticais indicam etapas específicas dos ciclos solares: ‘1’ representa o mínimo de atividade solar em 2019, ‘2’ representa a fase pós-pico do ciclo solar 24 em 2015 e ‘3’ representa a fase pré-pico do ciclo solar 25 em 2023. 115

Figura 6.3 - Variação temporal dos valores máximos de DIX registrados durante eventos de EPBs em pontos conjugados com inclinação magnética de 0° (linhas em vermelho), 10° (linhas em azul) e -10° (linhas em verde), obtidos nos meridianos oeste (painel esquerdo), central (painel do centro) e leste (painel direito) ao longo dos meses de setembro a maio de 2014-2015 (A), 2015-2016 (B), 2016-2017 (C), 2017-2018 (D) e 2018-2019 (E)..... 119

Figura 6.4 - Variação temporal dos valores máximos de DIX registrados durante eventos de EPBs em pontos conjugados com inclinação magnética de 0° (linhas em vermelho), 10° (linhas em azul) e -10° (linhas em verde), obtidos nos meridianos oeste (painel esquerdo), central (painel do centro) e leste (painel direito) ao longo dos meses de setembro a maio de 2019-2020 (A), 2020-2021 (B), 2021-2022 (C) e 2022-2023 (D)..... 121

Figura 6.5 - Variação temporal das extensões latitudinais máximas atingidas pelas perturbações ionosféricas associadas a EPBs nos meridianos oeste (painel A), central (painel B) e leste (painel C) no período entre 01/01/2015 e 30/04/2023. Em todos os gráficos, as linhas em preto representam as médias anuais das extensões máximas, enquanto as linhas vermelhas representam a latitude do equador magnético em cada um dos meridianos. O gráfico de barras na cor cinza (painel ‘D’) representa as médias anuais do índice F10.7 durante o mesmo período. 124

Figura 6.6 - Variação temporal das medidas de comprimento (km) das EPBs ao longo dos meses de setembro a maio durante os anos de 2014-2015 (A), 2015-2016 (B), 2016-2017

(C), 2017-2018 (D) e 2018-2019 (E). As medidas foram obtidas nos meridianos oeste (painel esquerdo, linhas em azul), central (painel do centro, linhas em vermelho) e leste (painel direito, linhas em verde).	126
Figura 6.7 - Variação temporal das medidas de comprimento (km) das perturbações ionosféricas associadas a EPBs ao longo dos meses de setembro a maio durante os anos de 2019-2020 (A), 2020-2021 (B), 2021-2022 (C) e 2022-2023 (D). As medidas foram obtidas nos meridianos oeste (painel esquerdo, linhas em azul), central (painel do centro, linhas em vermelho) e leste (painel direito, linhas em verde).	127
Figura 6.8 - Médias mensais das extensões latitudinais máximas (A) alcançadas pelas EPBs ao longo dos meses de setembro a maio de 2015 a 2023, juntamente com as médias do comprimento estimado (B) e do ângulo calculado entre terminador solar e meridiano (C), para cada um dos meridianos magnéticos: oeste (coluna esquerda, gráficos em azul), central (coluna do centro, gráficos em vermelho) e leste (coluna direita, gráficos em verde). Nas representações gráficas em ‘A’, a linha em preto representa a latitude do equador magnético em cada um dos meridianos.	129
Figura 6.9 - A: Médias mensais dos valores de assimetria inter-hemisférica ($^{\circ}$) obtidos durante eventos de EPBs nos meridianos oeste (painel esquerdo), central (painel do centro) e leste (painel direito), nos meses de setembro a maio de 2015 a 2023. A linha em preto representa o equador magnético. B: Médias mensais dos valores de vento efetivo (m/s) calculados em pontos conjugados nos meridianos oeste (painel esquerdo), central (painel do centro) e leste (painel direito), nos meses de setembro a maio de 2015 a 2023.....	131
Figura 6.10 - A: Gráficos de dispersão representando a relação entre os valores de F10.7 (SFU) e os comprimentos (km) das EPBs no período de 01/01/2015 a 30/04/2023 para os meridianos oeste (painel esquerdo, em azul), central (painel do centro, em vermelho) e leste (painel da direita, em verde). As linhas em preto representam os ajustes da função logarítmica feita para cada meridiano. B: Histogramas que ilustram a distribuição dos comprimentos das perturbações ionosféricas em cada um dos meridianos: oeste (painel esquerdo, em azul), central (painel do centro, em vermelho) e leste (painel da direita, em verde). Adicionalmente, exibe-se junto ao gráfico do meridiano leste um histograma (barras em cinza) estimado utilizando um fator de compensação.....	134

Figura 6.11 - Gráficos de dispersão ilustrando a relação linear entre os valores dos coeficientes a (painel esquerdo) e b (painel direito) e a declinação magnética de cada meridiano. Nos gráficos, a linha em vermelho representa a reta do ajuste linear de cada função obtida, enquanto os pontos em vermelho indicam os valores descartados em função da limitação do meridiano leste. 137

Figura 6.12 - Mapas ilustrando os resultados de simulações das extensões latitudinais máximas alcançadas pelas EPBs durante períodos geomagneticamente calmos em função da declinação magnética e do fluxo solar. Os dados foram obtidos para as seguintes datas: 15/01/2015 (A), 15/01/2020 (B) e 15/01/2023 (C). Nos mapas, as linhas em azul representam as latitudes máxima alcançadas pelas EPBs em ambos os hemisférios, enquanto as linhas em vermelho representam as coordenadas do equador magnético em cada uma das datas mencionadas..... 139

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Descrição dos blocos de lançamento dos satélites da constelação GPS.....	36
Tabela 3.2 - Resumo dos principais sinais modulados nas bandas L1, L2 e L5 do sistema GPS.....	40
Tabela 3.3 - Descrição das bandas de frequência (portadoras) transmitidas pelos satélites GLONASS.....	44
Tabela 3.4 - Resumo dos principais sinais modulados nas bandas L1, L2 e L3 do sistema GLONASS.....	45
Tabela 3.5 - Resumo dos principais sinais modulados nas bandas L1, L5 e L6 do sistema Galileo.....	49
Tabela 3.6 - Resumo dos principais sinais modulados nas bandas L1, L2 e L3 do sistema BeiDou.....	53
Tabela 4.1 - Pares de frequência selecionados para os sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou.....	68
Tabela 4.2 - Ordem de prioridade de seleção das observáveis L e C para o cálculo do TEC, de acordo com os canais de transmissão dos sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. O primeiro caractere do código da ordem de prioridades representa o canal prioritário, seguido pelos canais com menor prioridade em relação a este.	69
Tabela 5.1 - Classificação dos estados de perturbação da ionosfera com base nos valores observados no índice DIX.	81
Tabela 5.2 - Relação de instrumentos utilizados na validação metodológica do índice DIX durante eventos de EPBs. Destacam-se as localizações geográficas das estações utilizadas e o tipo de instrumento utilizado.	84
Tabela A.1 - Lista de estações GNSS disponíveis (1-50).....	163
Tabela A.2 - Lista de estações GNSS disponíveis (51-112).....	164
Tabela A.3 - Lista de estações GNSS disponíveis (113-174).....	165
Tabela A.4 - Lista de estações GNSS disponíveis (175-236).....	166
Tabela A.5 - Lista de estações GNSS disponíveis (237-298).....	167
Tabela A.6 - Lista de estações GNSS disponíveis (299-360).....	168
Tabela A.7 - Lista de estações GNSS disponíveis (361-422).....	169

Tabela A.8 - Lista de estações GNSS disponíveis (423-469).....	170
--	-----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASI	<i>All-Sky Imager</i>
BKG	<i>Bundesamt für Kartographie und Geodäsie</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CME	<i>Coronal Mass Ejection</i>
DCB	<i>Differential Code Bias</i>
DIX	<i>Disturbance Ionosphere index</i>
DIXMAP	<i>Disturbance Ionospheric index MAP</i>
ECEF	<i>Earth-centered, Earth-fixed</i>
EIA	<i>Equatorial Ionization Anomaly</i>
EPB	<i>Equatorial Plasma Bubble</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FOC	<i>Full Operational Capability</i>
GEO	<i>Geostationary</i>
GF	<i>Geometry Free</i>
GIOVE	<i>Galileo In-Orbit Validation Element</i>
GLONASS	<i>GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GOLD	<i>Global-scale Observations of the Limb and Disk</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HWM-14	<i>Horizontal Wind Model 14</i>
IF	<i>Ionosphere Free</i>
IFB	<i>Inter-Frequency Bias</i>

IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGSO	<i>Inclined Geosynchronous Orbit</i>
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
IOV	<i>In-Orbit Validation</i>
IPP	<i>Ionospheric Pierce Point</i>
IWV	<i>Integrated Water Vapor</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LISN	<i>Low-Latitude Ionospheric Sensor Network</i>
LT	<i>Local Time</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MGEX	<i>Multi-GNSS Experiment</i>
MSLM	<i>Modified Single-Layer Model</i>
MSTID	<i>Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbance</i>
MW	<i>Melbourne–Wübbena</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NED	<i>North-East-Down</i>
PRE	<i>Prereversal Enhancement</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTI	<i>Rayleigh-Taylor Instability</i>
RAMSAC	<i>Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo</i>

RDSS	<i>Radio Determination Satellite Service</i>
RNSS	<i>Radio Navigation Satellite Service</i>
ROT	<i>Rate Of change of TEC</i>
ROTI	<i>Rate Of change of TEC Index</i>
SAMI3	<i>SAMI is Another Model of the Ionosphere</i>
SGM	<i>Servicio Geográfico Militar</i>
SIP	<i>Sub-ionospheric Pierce Point</i>
SLM	<i>Single-Layer Model</i>
SP3	<i>Standard Precise Ephemeris Format</i>
STEC	<i>Slant Total Electron Content</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>Total Electron Content Unit</i>
TGD	<i>Transmitter Group Delay</i>
UNAVCO	<i>University NAVSTAR Consortium</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VTEC	<i>Vertical Total Electron Content</i>
WACCM-X	<i>Whole Atmosphere Community Climate Model with thermosphere and ionosphere eXtension</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 BOLHAS DE PLASMA NA IONOSFERA EQUATORIAL: TEORIA E OBSERVAÇÕES	6
2.1 Visão geral sobre as bolhas de plasma (EPBs)	6
2.2 Condições eletrodinâmicas para o desenvolvimento das EPBs	8
2.2.1 A Instabilidade Rayleigh-Taylor (RTI)	11
2.2.2 Etapas no desenvolvimento das EPBs	13
2.3 Morfologia e variabilidade das EPBs na ionosfera equatorial	15
2.3.1 Principais características morfológicas	15
2.3.2 Variabilidade das EPBs em função de seus mecanismos geradores	19
2.4 Técnicas de observação das EPBs.....	25
2.5 Resultados recentes e tópicos em aberto sobre o estudo de EPBs	32
3 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: GPS, GLONASS, GALILEO E BEIDOU	34
3.1 Visão geral sobre os sistemas GNSS	34
3.2 Segmento espacial e características dos sinais GNSS.....	35
3.2.1 GPS	36
3.2.2 GLONASS.....	41
3.2.3 Galileo	46
3.2.4 BeiDou	50
3.3 Segmento de usuários e padrão de observáveis GNSS (RINEX)	53
3.4 Segmento de controle e padrão de órbitas GNSS (SP3)	54
4 METODOLOGIA: CÁLCULO DO TEC UTILIZANDO DADOS DE SISTEMAS GNSS.....	56
4.1 Equação da produção de elétrons livres na ionosfera	56
4.2 Modelo ionosférico de camada unitária	58
4.2.1 Cálculo das coordenadas do IPP utilizando dados GNSS	60
4.3 Pré-processamento das observáveis GNSS utilizando combinações lineares.....	66
4.3.1 Primeira etapa: pré-seleção de observáveis GNSS.....	67

4.3.2 Segunda etapa: delimitação de intervalos com observações contínuas.....	69
4.3.3 Terceira etapa: obtenção de medidas de fase e pseudodistância corrigidas.....	71
4.4 Nivelamento e modelagem das medidas de fase.....	73
4.4.1 Cálculo dos erros sistemáticos (DCBs/ IFBs)	75
4.5 Cálculo do TEC utilizando observáveis corrigidas	76
5 METODOLOGIA: ANÁLISE DAS PERTURBAÇÕES IONOSFÉRICAS ASSOCIADAS A EPBS	79
5.1 Análise do grau de perturbação da ionosfera utilizando o índice DIX	79
5.1.1 Cálculo do DIX.....	79
5.1.1.1 Validação do DIX durante EPBs	82
5.1.2 Estações GNSS utilizadas.....	92
5.1.3 Obtenção de DIXMAPs sobre a América Latina	94
5.2 Técnicas de análise de perturbações ionosféricas associadas a EPBs.....	99
5.2.1 Keogramas meridionais	99
5.2.2 Sistema automático de detecção e parametrização de perturbações ionosféricas.....	103
5.2.2.1 Cálculo da extensão latitudinal.....	106
5.2.2.2 Cálculo da assimetria inter-hemisférica	107
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISE DAS PERTURBAÇÕES IONOSFÉRICAS ASSOCIADAS A EPBS NOS CICLOS SOLARES 24 E 25 ...	109
6.1 Variabilidade na intensidade de perturbações ionosféricas associadas a EPBs....	111
6.1.1 Variação em função da atividade solar.....	111
6.1.2 Comportamento sazonal ao longo dos ciclos solares 24 e 25.....	117
6.2 Influência da atividade solar sobre a extensão latitudinal das EPBs.....	122
6.3 Variação sazonal e longitudinal do desenvolvimento latitudinal das EPBs.....	125
6.4 Variabilidade sazonal das assimetrias inter-hemisféricas observadas em eventos de EPBs.....	130
6.5 Proposta de modelo empírico para o desenvolvimento latitudinal e a variabilidade longitudinal das EPBs.....	133
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	141
7.1 Conclusões	141
7.2 Trabalhos futuros.....	143

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
ANEXO A – LISTA DE ESTAÇÕES GNSS DISPONÍVEIS	163

1 INTRODUÇÃO

As bolhas de plasma (EPBs, do inglês *Equatorial Plasma Bubbles*) são fenômenos da ionosfera caracterizados por regiões irregulares onde a densidade do plasma é significativamente menor do que a densidade de regiões adjacentes (KELLEY, 2009). A formação das EPBs tem como fator principal a ocorrência de instabilidades que se propagam desde regiões onde o plasma é menos denso (abaixo da camada F2) até regiões com maior densidade (camada F2) (HAERENDEL, 1973). A propagação dessas irregularidades para regiões superiores da ionosfera pode ser descrita pela evolução não-linear da Instabilidade Rayleigh-Taylor (RTI, do inglês *Rayleigh-Taylor Instability*). A RTI é desencadeada ao longo da formação de gradientes verticais de plasma devido ao aumento súbito da velocidade de deriva vertical noturna da Região F em conjunto com um mecanismo de disparo na sua base, geralmente associado a ondas de gravidade) (ROTTGER, 1973; WOODMAN; LA HOZ, 1976; KELLEY, 1989; ABDU, 1993; SINGH et al. 1997a, TAORI et al. 2015; TAKAHASHI et al., 2018).

Durante a ocorrência das EPBs, a ionosfera pode apresentar regiões com diferenças de densidade de mais de duas ordens de grandeza. Essas regiões se difundem ao longo das linhas de campo em ambos os hemisférios magnéticos, alcançando latitudes máximas em função da altura limite de deslocamento vertical no equador magnético (ABDU et al., 1985; KELLEY, 2009; BARROS et al., 2018). Nesse contexto, as EPBs podem ser estudadas por meio da análise de depleções no conteúdo eletrônico total (TEC, do inglês *Total Electron Content*) calculado a partir de dados de sistemas globais de navegação por satélite (GNSS, do inglês *Global Navigation Satellite Systems*) (ABDU et al., 1985; TAKAHASHI et al., 2016; BARROS et al., 2018), bem como por outros instrumentos, tais como radares VHF (do inglês *Very High Frequency*) (TSUNODA, 1981; ABDU et al., 2009), ionossondas (RESENDE et al., 2019), imageadores All-Sky (PIMENTA et al., 2003; PAULINO et al., 2011; WRASSE et al., 2021), foguetes de sondagem (ABDU et al., 1991; MURALIKRISHNA et al., 2006) e satélites de observação da Terra (HUANG et al., 2002, 2013; MCNAMARA et al., 2013). Dessa forma, o uso de instrumentos distintos permite o estudo dessas irregularidades em diferentes longitudes, latitudes e alturas na ionosfera (WOODMAN e HOZ, 1976; FLAHERTY et al., 1996).

Os elétrons livres presentes na ionosfera afetam diretamente a propagação dos sinais GNSS utilizados no cálculo do TEC, ocasionando em atrasos relacionados à refração ionosférica (OTSUKA et al., 2002; MONICO, 2008; TAKAHASHI et al., 2016). Esse efeito é frequentemente utilizado na estimativa da amplitude das depleções no TEC associadas à ocorrência das EPBs. Diante disso, Jakowski et al. (2006) desenvolveram um índice de perturbação da ionosfera (DIX, do inglês *Disturbance Ionosphere index*) baseado na variação percentual do TEC com relação a um referencial não-perturbado. Tal metodologia serviu como referência para o desenvolvimento de novas versões do índice, obtidas por meio da modificação e inclusão de novos termos no âmbito da equação original (JAKOWSKI et al., 2012a, 2012b, 2019; WILKEN et al., 2018; PICANÇO, 2019; DENARDINI et al., 2020a; BARBOSA-NETO, 2020). Desse modo, o DIX corresponde a um valor do grau de perturbação da ionosfera associado a flutuações na magnitude do TEC diretamente causadas por fenômenos ionosféricos de origem externa (ex.: tempestades geomagnéticas) (DENARDINI et al., 2020a; PICANÇO et al., 2021) e interna (ex.: bolhas de plasma) (DENARDINI et al., 2020b; PICANÇO et al., 2022). Sendo assim, este trabalho faz uso de uma nova metodologia para estudar a variabilidade da ionosfera durante eventos de EPBs, a qual foi baseada na equação do índice DIX apresentada em Picanço (2019), e aprimorada em Denardini et al. (2020a) e Barbosa-Neto (2020).

Certamente, as EPBs são um fenômeno bastante conhecido na comunidade científica. Embora o termo “bolhas de plasma” tenha sido utilizado apenas na segunda metade da década de 1970 (WOODMAN; LAHOZ, 1976), diversos estudos têm sido conduzidos desde meados da década de 1940 para analisar as principais propriedades físicas desses fenômenos (ROSS; ERAMLEY, 1949; HINES, 1960). É notável que, na última década, tenha emergido uma nova tendência de estudos baseados em índices ionosféricos, à medida que os dados de sistemas GNSS se tornam cada vez mais acessíveis e abundantes (CHERNIAK et al., 2016, 2019; ZAKHARENKOVA; CHERNIAK, 2021; LI et al., 2022).

Diante do exposto, a principal motivação deste estudo surge da necessidade de explorar a variabilidade nos aspectos físicos das EPBs, tendo em vista os avanços contínuos nas técnicas de observação. Nesse contexto, o objetivo principal desta tese é identificar, analisar e parametrizar as perturbações ionosféricas associadas às EPBs sobre a América

Latina durante a evolução dos ciclos solares 24 e 25, fazendo uso do índice DIX como a ferramenta principal para essa análise. Dessa forma, espera-se que o uso desses dados possa auxiliar na compreensão da forma com que as EPBs modificam a densidade e a distribuição do plasma ionosférico a nível local e regional. Em particular, o desenvolvimento deste trabalho visa preencher algumas lacunas científicas que estão alinhadas com os objetivos específicos deste estudo, os quais são apresentados a seguir:

- Aperfeiçoar a metodologia do índice DIX para aprimorar a sua capacidade em detectar EPBs, tendo como área de estudo e validação a região da América Latina;
- Avaliar o comportamento do DIX durante eventos de EPBs selecionados no período entre 2015 e 2023, correspondendo às fases pós-pico do ciclo solar 24 e pré-pico do ciclo solar 25;
- Estudar a variação sazonal e com a atividade solar das principais características morfológicas das perturbações ionosféricas associadas às EPBs durante o mesmo período;
- Comparar as perturbações ionosféricas observadas em ambos os hemisférios magnéticos utilizando o DIX, com o intuito de estudar assimetrias inter-hemisféricas e suas variações sazonais e espaciais na resposta aos eventos de EPBs; e
- Analisar a influência da declinação magnética sobre a morfologia e sazonalidade das perturbações ionosféricas causadas por EPBs.

O desenvolvimento deste estudo concentrou-se em três etapas: validação, identificação e análise. Inicialmente, o índice DIX passou por um processo de validação utilizando dados de TEC obtidos com uma nova metodologia ([MENDOZA et al., 2019](#)), tendo ênfase na avaliação de sua capacidade em descrever a resposta ionosférica a eventos de EPBs. Após o êxito da validação, realizou-se uma investigação abrangente das perturbações ionosféricas durante o período de 01/01/2015 a 30/04/2023. Esta investigação teve como foco os meses de setembro a maio de cada ano, período de maior ocorrência de EPBs sobre a região Brasileira ([BARROS, 2017](#)). De forma específica, a análise concentrou-se em eventos ocorridos durante o período noturno, totalizando 1164 noites com a ocorrência de EPBs. Ressalta-se que o período referente a 2020 não foi analisado em

função da ausência de dados. Sendo assim, o novo conjunto de dados foi minuciosamente analisado, levando em consideração uma vasta quantidade de estudos encontrados na literatura científica. Essa análise não se limitou apenas à descrição da morfologia das perturbações ionosféricas em diferentes condições de atividade solar, mas também explorou possíveis conexões físicas entre as observações e os mecanismos subjacentes que controlam as principais características morfológicas das EPBs, tais como extensão latitudinal, comprimento estimado, amplitude de depleção e assimetria inter-hemisférica. Por fim, a análise foi conduzida abrangendo diferentes setores de inclinação e declinação magnética, épocas do ano e níveis de atividade solar.

Esta tese foi dividida em sete capítulos e organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1: O presente capítulo oferece uma breve introdução aos conceitos abordados, bem como descreve os objetivos e a motivação subjacentes à realização desta tese.
- Capítulo 2: Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos relacionados ao fenômeno das EPBs, bem como suas principais características físicas e morfológicas. Adicionalmente, é feita uma breve discussão sobre as principais técnicas de observação, resultados recentes e tópicos em aberto no estudo das EPBs.
- Capítulo 3: Neste capítulo, é feita uma atualização sobre os principais fundamentos relacionados aos dados de sistemas GNSS utilizados neste trabalho. São abordados os elementos fundamentais sobre a instrumentação e os dados empregados no cálculo do TEC, tendo como foco os sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. Em adição, são mencionados os formatos e padrões utilizados no processamento de observáveis e órbitas para a construção de mapas ionosféricos.
- Capítulo 4: Este capítulo apresenta a metodologia de cálculo do TEC utilizada para gerar os dados necessários à obtenção do índice DIX. É feita uma descrição minuciosa de cada uma das etapas, desde o pré-processamento dos sinais apresentados no Capítulo 3, até a obtenção dos dados a serem utilizados na análise apresentada no Capítulo 5, a seguir.

- Capítulo 5: Neste capítulo, é feita a apresentação da metodologia de análise das perturbações ionosféricas associadas a EPBs, tendo como foco o uso de dados do índice DIX. Adicionalmente, são descritas as técnicas de análise e obtenção de parâmetros morfológicos das EPBs, tais como amplitude de depleção, extensão latitudinal e assimetria inter-hemisférica.
- Capítulo 6: Neste capítulo, são apresentados os resultados e as discussões da análise das perturbações ionosféricas associadas a EPBs durante os ciclos solares 24 e 25, com ênfase na ionosfera sobre a América Latina. São exploradas as principais características morfológicas das EPBs, além dos mecanismos físicos que exercem controle sobre as principais propriedades desses fenômenos.
- Capítulo 7: Neste capítulo, são apresentadas as conclusões derivadas dos resultados e análises deste estudo. Além disso, apresenta-se uma visão geral do desenvolvimento do trabalho, bem como possíveis direções para pesquisas futuras dentro desta mesma área de estudo.

2 BOLHAS DE PLASMA NA IONOSFERA EQUATORIAL: TEORIA E OBSERVAÇÕES

Este capítulo apresenta uma visão abrangente sobre os mecanismos físicos que controlam a formação de bolhas de plasma na ionosfera equatorial. Na Seção 2.1 é feita uma introdução ao tema das bolhas de plasma, abordando suas características essenciais. Na Seção 2.2 é feita uma descrição das condições eletrodinâmicas que propiciam o surgimento das bolhas de plasma, incluindo a teoria da instabilidade Rayleigh-Taylor e as etapas no desenvolvimento das irregularidades. Em seguida, a Seção 2.3 explora a morfologia das bolhas de plasma, destacando suas características principais e os fatores que influenciam sua variabilidade. A Seção 2.4 discute as diferentes técnicas de observação utilizadas para estudar as bolhas de plasma na ionosfera equatorial. Finalmente, na Seção 2.5 apresenta-se uma discussão sobre os resultados mais recentes e as questões em aberto relacionadas ao estudo das bolhas de plasma.

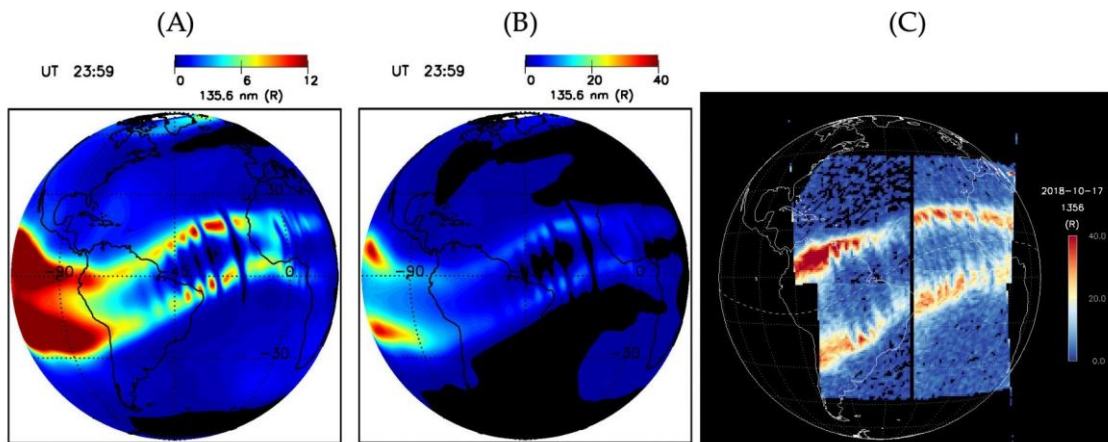
2.1 Visão geral sobre as bolhas de plasma (EPBs)

As bolhas de plasma são fenômenos que têm origem na ionosfera equatorial, caracterizados principalmente pela formação de estruturas extensas nas quais a densidade do plasma é significativamente menor do que em regiões adjacentes (KELLEY, 2009). Esses fenômenos têm origem no equador magnético, estando associados ao surgimento de gradientes verticais de plasma devido à rápida elevação da Região F ionosférica no período após o pôr do Sol. Adicionalmente, um mecanismo de disparo (e.g. ondas de gravidade) na base da Região F pode desencadear o surgimento de uma instabilidade no plasma, a qual se desloca para altitudes superiores enquanto se expande e se difunde ao longo das linhas de campo geomagnético, caracterizando a estrutura típica das EPBs (MARUYAMA; MATUURA, 1984; ABDU, 2001; KELLEY et al., 2003).

Com o intuito de ilustrar uma visão em plano superior da ocorrência de EPBs na ionosfera equatorial, a Figura 2.1 exhibe exemplos de simulações (A e B) e observações (C) desse fenômeno em escala global. Em ambos os cenários, simulado e observado, os dados correspondem a emissões de oxigênio atômico na linha de 135,6 nm (OI-135,6), os quais são frequentemente utilizados no estudo de irregularidades ionosféricas a nível global (EASTES et al., 2019; WAUTELET et al., 2019). Os dados de simulação são

provenientes do modelo ionosférico número 3 (SAMI3, do inglês *SAMI is Another Model of the Ionosphere*) e do modelo climático da termosfera-ionosfera (WACCM-X, do inglês *Whole Atmosphere Community Climate Model with thermosphere and ionosphere eXtension*) desenvolvidos por [Huba e Liu \(2020\)](#). Os dados de observações são provenientes do satélite GOLD (do inglês *Global-scale Observations of the Limb and Disk*) ([EASTES et al., 2019](#)).

Figura 2.1 – Exemplo de comparação entre emissões simuladas (A, B) e observadas (C) do OI-135,6 nm utilizando dados do modelo SAMI3/WACCM-X e do satélite GOLD.



Fonte: Adaptado de [Eastes et al. \(2019\)](#) e [Huba e Liu \(2020\)](#).

Mediante a Figura 2.1, nota-se que as depleções relacionadas às EPBs aparecem como regiões com menor emissão de OI-135,6 nm, estando essas áreas delimitadas pelas bordas internas das cristas da anomalia equatorial de ionização (EIA, do inglês *Equatorial Ionization Anomaly*). A redução nas emissões de OI-135,7 nessas áreas indica a ocorrência de depleções no plasma, as quais são produzidas por instabilidades originadas no equador magnético que se deslocam em direção às cristas da EIA. Essas irregularidades se expandem para latitudes magnéticas mais altas à medida em que se desenvolvem. É importante observar que essas depleções apresentam uma notável simetria no plano meridional em relação ao equador magnético.

É comum a utilização de diferentes nomenclaturas para se referir às EPBs, a depender da instrumentação utilizada. Diversos autores nomeiam as irregularidades de grande escala como “plumas ionosféricas” quando detectadas utilizando medidas de radar ([KELLEY et](#)

al., 2003; ABDU et al., 2009). Por outro lado, utiliza-se o termo “spread F” para se referir às irregularidades observadas utilizando ionossondas (ABDU et al., 1981; RESENDE et al., 2019), bem como do termo “depleções de plasma” ao se analisar dados de TEC obtidos utilizando dados de sistemas GNSS (TAKAHASHI et al., 2016). De fato, o termo “bolhas de plasma” é mais comumente utilizado na literatura recente em estudos que utilizem dados de imageadores All-Sky (ASI, do inglês *All-Sky Imager*), uma vez que estes instrumentos possibilitam uma visão precisa dos atributos morfológicos das EPBs em condições específicas (SOBRAL et al., 2009; PAULINO et al., 2011; PIMENTA et al., 2001, 2003; TAKAHASHI et al., 2015). É importante destacar que todas as nomenclaturas mencionadas podem descrever o mesmo fenômeno observado na ionosfera equatorial, embora seja possível observar resultados divergentes em relação à utilização de diferentes instrumentos (HICKEY et al., 2020).

Estudos recentes têm se concentrado em analisar principalmente as características dinâmicas e morfológicas das EPBs, tais como a extensão latitudinal (SAHA et al., 2022), a frequência de ocorrência (BARROS et al., 2018) e velocidades de propagação (CARMO et al., 2023). No entanto, os esforços da comunidade científica ainda estão em curso no sentido de compreender de forma abrangente os mecanismos de controle físico das propriedades morfológicas das EPBs, a fim de estudar sua variabilidade em diferentes setores longitudinais e níveis de atividade solar. Portanto, nas seções seguintes apresenta-se uma síntese dos principais conceitos relacionados à formação de EPBs, estabelecendo os fundamentos necessários para a compreensão dos mecanismos de controle morfológico desses fenômenos, a fim de proporcionar uma breve revisão teórica para a leitura deste trabalho.

2.2 Condições eletrodinâmicas para o desenvolvimento das EPBs

A ionosfera equatorial passa por mudanças consideráveis na transição entre o pôr do Sol e o período noturno. Nesse intervalo de tempo, a linha do terminador solar passa pela ionosfera e a fotoionização dos constituintes atmosféricos neutros é interrompida de maneira abrupta (RISHBETH, 2000; TAKAHASHI et al., 2015). Um dos principais fenômenos que ocorrem durante esse período é o pico pré-reversão da deriva vertical do plasma ionosférico (PRE, do inglês *Prereversal Enhancement*). O PRE consiste em uma intensificação na velocidade da deriva vertical na Região F que antecede a inversão do

seu sentido, ocorrendo por volta das 18:00 LT (do inglês *Local Time*) (FARLEY et al., 1986). A deriva vertical do plasma já é um conceito bem estabelecido na literatura científica, havendo o pleno consenso de que esta tem velocidade positiva (para cima) durante o dia e negativa (para baixo) durante a noite, sendo este fator relacionado principalmente à direção do campo elétrico zonal (ABDU et al., 1981; BATISTA et al., 1986; FEJER et al., 1981). Dessa forma, sabe-se que um dos pré-requisitos para o desenvolvimento das EPBs é a ocorrência do PRE, consistindo na elevação rápida da Região F sob condições eletrodinâmicas específicas (FARLEY et al., 1970; WOODMAN, 1970; FEJER et al., 1979; ABDU et al., 1983).

O PRE tem origem próximo ao terminador solar durante o desenvolvimento do dínamo da Região F (KELLEY, 2009; SANTOS, 2013), fenômeno que corresponde ao mecanismo de geração de campos elétricos a partir da ação de ventos termosféricos zonais sobre partículas eletricamente carregadas (RISHBETH, 1971; KELLEY, 2009). Neste contexto, gradientes horizontais de pressão são produzidos na termosfera em resposta ao aquecimento solar. Esses gradientes dão origem a ventos termosféricos horizontais que, por sua vez, induzem movimento às partículas eletricamente carregadas da Região F (BATISTA, 1986; FULLER-ROWELL, 1995). O movimento essencial ocasionado pelos ventos termosféricos é a deriva de íons e elétrons ao longo das linhas de campo geomagnético, o que corresponde à componente do vento na direção do campo. Além dessa deriva, há um movimento com menor velocidade na direção perpendicular ao campo geomagnético e ao vento termosférico. Esse movimento é descrito pela Equação 2.1 (BATISTA, 1986):

$$\vec{V} = \frac{\nu\omega}{\nu^2 + \omega^2} \frac{\vec{U} \times \vec{B}}{B}, \quad (2.1)$$

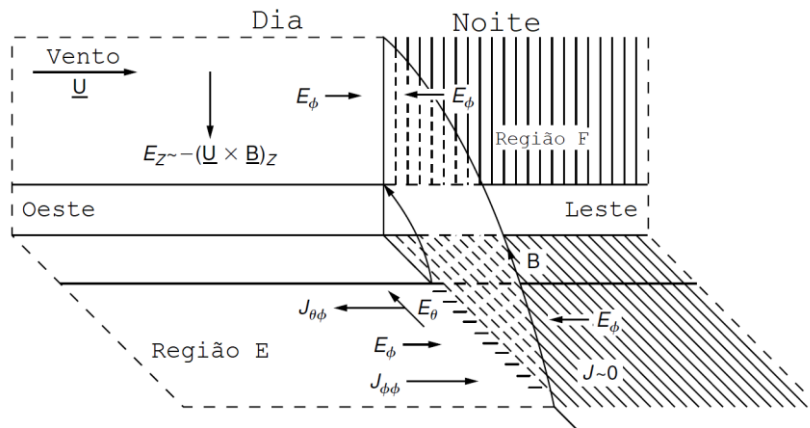
onde \vec{V} é a velocidade das partículas eletricamente carregadas, \vec{U} é a velocidade do vento termosférico, \vec{B} é o vetor de indução magnética, ν é a frequência de colisão entre partículas neutras e partículas carregadas, e $\omega = qB/m$ é a girofrequência das partículas, onde q representa a carga e m a massa destas.

Devido à dependência de \vec{V} com o sinal da carga, q , nota-se que os íons se moverão no sentido de $\vec{U} \times \vec{B}$, enquanto os elétrons se moverão no sentido oposto. Isso resultará na criação de um campo elétrico de polarização que é efetivamente curto-circuitado durante

o dia, devido à alta condutividade da Região E. Contudo, no pôr do Sol, quando a condutividade da Região E diminui drasticamente, esse campo elétrico de polarização adicional irá propiciar as condições eletrodinâmicas para o desenvolvimento do PRE.

A Figura 2.2 ilustra os processos que compõem o mecanismo de formação do PRE, tendo como origem o vento termosférico.

Figura 2.2 - Modelo simplificado do mecanismo de formação do pico pré-reversão.



Fonte: Adaptado de Kelley (2009).

De acordo com a Figura 2.2, observa-se no lado diurno um vento termosférico constante (\vec{U}) orientado para leste durante o dia na Região F. A interação desse vento com o campo geomagnético (\vec{B}) irá resultar em um movimento de partículas eletricamente carregadas ao longo do eixo vertical (z). Esse movimento de partículas dá origem a um campo elétrico de polarização vertical direcionado para baixo (E_z). Devido à interrupção da fotoionização, a Região E ionosférica não possuirá condutividade suficiente para neutralizar E_z próximo ao terminador solar. Dessa forma, o campo E_z será mapeado para a Região E por meio das linhas de campo geomagnético na forma de um campo elétrico direcionado para o equador (E_θ). A interação de E_θ com o campo geomagnético irá produzir uma corrente Hall no sentido leste-oeste ($J_{\theta\phi}$) na Região E. Devido à recombinação dos íons, a condutividade elétrica do lado noturno passa a ser muito baixa. Sendo assim, a corrente Hall, $J_{\theta\phi}$, só será significativa no lado diurno. Devido a isso, haverá um acúmulo de cargas na região do terminador solar. Essas cargas produzirão campos elétricos de polarização direcionados para o terminador (E_ϕ) em ambos os lados,

dia e noite. No lado diurno, esses campos elétricos irão originar uma segunda corrente Pedersen ($J_{\phi\phi}$), que anulará a primeira ($J_{\theta\phi}$). O resultante desse sistema de correntes será o campo elétrico de polarização, E_{ϕ} , que será mapeado para a Região F pelas linhas de campo geomagnético. Esse campo elétrico adicional irá produzir um aumento na velocidade de deriva vertical (PRE) próximo das 18:00-19:00 LT, o qual antecipa a inversão do sentido de deriva. Logo após a ocorrência do PRE, a velocidade de deriva tende a diminuir rapidamente, devido à inversão de sentido do campo elétrico de polarização durante a noite (FEJER et al., 1991, 2008).

Portanto, é importante destacar que a intensificação na velocidade da deriva vertical, juntamente com a produção de gradientes verticais de plasma na Região F, cria uma condição favorável em que um mecanismo de disparo pode desencadear uma instabilidade capaz de evoluir para um evento de EPB (ABDU, 2005; KELLEY, 2009). Os detalhes sobre o desenvolvimento dessa instabilidade são abordados de forma mais abrangente na seção a seguir.

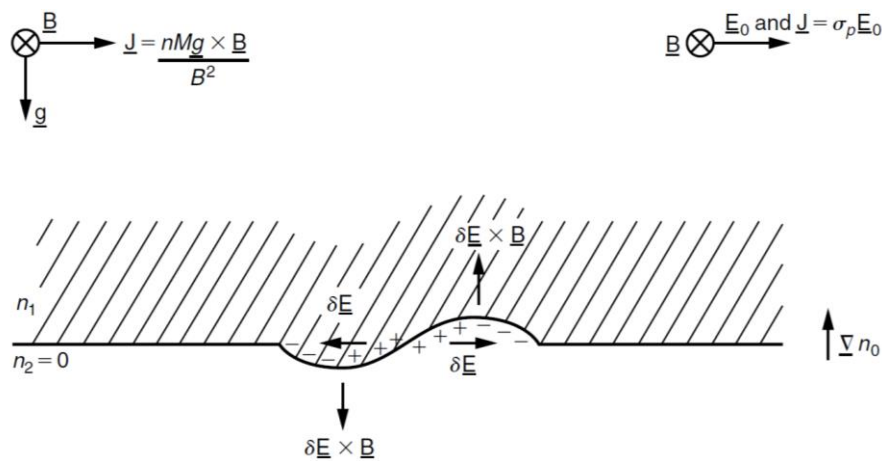
2.2.1 A Instabilidade Rayleigh-Taylor (RTI)

As EPBs resultam da evolução de instabilidades do plasma na base da Região F, conforme aproximado pela teoria da RTI. Alguns dos possíveis mecanismos de disparo capazes de desencadear o desenvolvimento de EPBs são as ondas de gravidade (ROTTGER, 1973; HUANG; KELLEY, 1996; FAGUNDES et al., 1995, SINGH et al., 1997a) e os MSTIDs (do inglês *Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances*) (TAORI et al., 2015; TAKAHASHI et al., 2015). A teoria da RTI descreve como essas instabilidades na base da Região F podem gerar irregularidades no plasma ionosférico e como essas irregularidades se desenvolvem até a ionosfera superior, caracterizando as EPBs (DUNGEY, 1956; HAERENDEL, 1973; HUDSON; KENNEL, 1975; ABDU, 1993; KELLEY, 2009). Nesse contexto, a intensificação na velocidade de deriva do plasma (PRE) faz com que a Região F seja elevada para alturas superiores, onde a taxa de crescimento da RTI torna-se alta o suficiente para que as EPBs se desenvolvam (HUANG et al., 2012). Adicionalmente, a densidade do plasma da Região E tende a diminuir rapidamente devido à alta taxa de recombinação iônica próximo ao terminador solar. Essas condições proporcionam um ambiente no qual um meio mais denso é sustentado

por outro menos denso, caracterizando, assim, um sistema de equilíbrio instável onde os mecanismos de disparo podem produzir instabilidades.

A Figura 2.3 ilustra o mecanismo pelo qual a RTI causa a propagação de irregularidades de plasma na ionosfera equatorial. A ionosfera é representada de forma estratificada, onde um meio mais denso (n_1) encontra-se acima de um menos denso (n_2). Dessa forma, considera-se que $n_1 \neq 0$ e $n_2 = 0$. O campo gravitacional (\vec{g}) aponta para baixo, sendo antiparalelo ao gradiente de densidade (∇n_0). O campo geomagnético (\vec{B}) é horizontal, apontando para o interior da figura. Além disso, assume-se que o plasma é não-colisional e que haja uma pequena perturbação na interface entre os dois meios (mecanismo de disparo).

Figura 2.3 – Ilustração do mecanismo de formação da Instabilidade Rayleigh-Taylor.



Fonte: Kelley (2009).

Na presença de \vec{g} , o campo geomagnético irá induzir uma corrente de partículas eletricamente carregadas na direção horizontal (\vec{J}). Como a velocidade das partículas é diretamente proporcional às suas massas, o domínio do termo iônico se torna evidente. Dessa forma, essa corrente fluirá com uma magnitude expressa por (KELLEY, 2009):

$$\vec{J} = \frac{nM\vec{g} \times \vec{B}}{B^2} \quad , \quad (2.2)$$

onde M é a massa dos íons e n a densidade do plasma.

Devido à perturbação inicial, ocorrerá uma divergência no fluxo de corrente, resultando no acúmulo de cargas nas bordas da região inicialmente perturbada. Esse acúmulo de cargas irá dar origem a um campo elétrico de polarização ($\delta\vec{E}$). Esse campo, por sua vez, irá originar uma deriva de plasma ($\delta\vec{E} \times \vec{B}$), deslocando a região menos densa para cima e a mais densa no sentido oposto, produzindo uma condição de propagação da irregularidade até alturas elevadas.

A taxa de crescimento da RTI leva em consideração o campo elétrico do ambiente, os ventos termosféricos, os gradientes verticais de densidade do plasma e as condutividades Pedersen integradas ao longo das linhas de campo para as regiões E e F. Dessa forma, a taxa de crescimento da RTI pode ser obtida por meio da Equação 2.3 (SULTAN, 1996; BARROS, 2017):

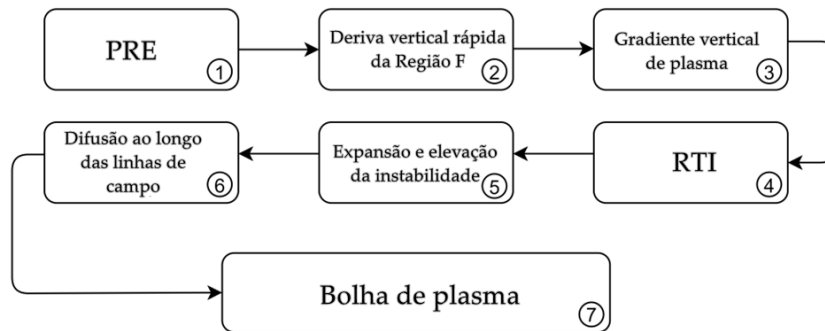
$$\gamma = \frac{\Sigma_P^F}{\Sigma_P^{E,N} + \Sigma_P^F + \Sigma_P^{E,S}} \left(\frac{\vec{E}}{B} - \vec{U} - \frac{\vec{g}}{v_{in}} \right) \frac{\Delta n_0}{n_0} - \beta, \quad (2.3)$$

onde \vec{E} representa o campo elétrico do ambiente, B é a magnitude do campo geomagnético, \vec{g} é a aceleração da gravidade, v_{in} é a frequência de colisão entre íons e partículas neutras, β é a taxa de recombinação dos íons majoritários e \vec{U} é a velocidade do vento termosférico. Os termos $\Sigma_P^{E,N}$, Σ_P^F e $\Sigma_P^{E,S}$ representam as condutividades Pedersen integradas ao longo das linhas de campo geomagnético para as regiões E e F nos pontos conjugados ao norte e ao sul de um determinado tubo de fluxo.

2.2.2 Etapas no desenvolvimento das EPBs

Na Figura 2.4 apresenta-se um esquema que resume as etapas de formação e desenvolvimento das bolhas de plasma na ionosfera equatorial. Em síntese, o pico pré-reversão da deriva vertical do plasma (1) proporciona a elevação rápida da Região F para alturas onde a taxa de crescimento da RTI é mais significativa (2). Esse deslocamento da Região F produz um gradiente vertical de plasma (3). Em seguida, um mecanismo de disparo gera uma instabilidade na base da Região F (4), resultando no desenvolvimento de uma irregularidade no plasma que tende a se expandir e elevar até alturas superiores (5). Finalmente, essa irregularidade se difunde ao longo das linhas de campo (6), caracterizando a estrutura típica das bolhas de plasma (7) (ABDU, 2001).

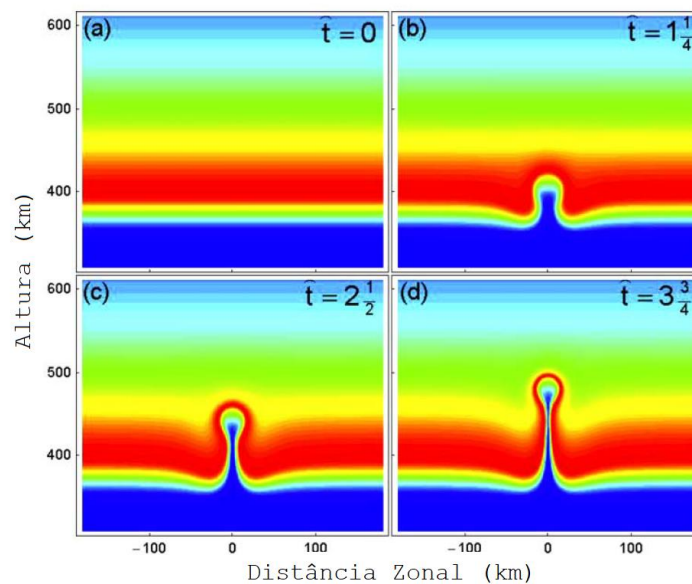
Figura 2.4 - Etapas da formação de bolhas de plasma na ionosfera equatorial.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 2.5 apresenta-se uma sequência de imagens que representam a evolução da RTI na ionosfera, de modo a ilustrar a formação de uma EPB. Na escala de cores o vermelho representa maior densidade, enquanto o azul representa menor densidade. Nesta figura, representa-se a ionosfera como um meio estratificado, no qual uma camada mais densa é sustentada por outra com menor densidade (a). O tempo $t = 0$ representa o estado inicial não perturbado da ionosfera. No tempo $t = 1$ (b) surge uma perturbação na base do meio mais denso, gerando uma instabilidade (c), a qual gera posteriormente a bolha de plasma (d) ao se propagar para uma altura elevada.

Figura 2.5 - Ilustração sequencial da evolução da Instabilidade Rayleigh-Taylor na ionosfera.



Fonte: Adaptado de [Bernhardt \(2007\)](#).

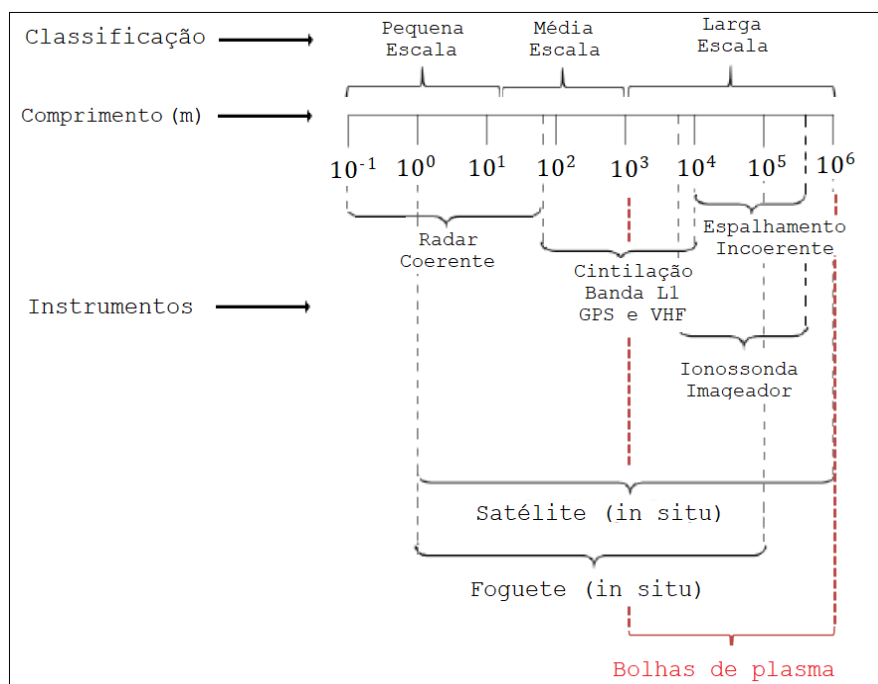
2.3 Morfologia e variabilidade das EPBs na ionosfera equatorial

2.3.1 Principais características morfológicas

As irregularidades ionosféricas, em geral, abrangem um amplo espectro de escalas de tamanho, variando desde alguns centímetros até centenas de quilômetros (FARLEY et al., 1970; WOODMAN; LAHOZ, 1976). No entanto, as EPBs, que são irregularidades ionosféricas de larga escala, podem alcançar dimensões de até milhares de quilômetros de acordo com a eficiência dos seus mecanismos geradores (SOBRAL et al., 2002).

Na Figura 2.6 é apresentada uma classificação das irregularidades ionosféricas com base em sua extensão latitudinal, juntamente com uma descrição dos principais instrumentos utilizados na observação de cada classe de irregularidade. Essa classificação evidencia que as EPBs são, de fato, as irregularidades mais extensas encontradas na ionosfera terrestre.

Figura 2.6 - Classificação das irregularidades ionosféricas de acordo com a sua extensão latitudinal.



Fonte: Adaptado de Pimenta (2003).

As EPBs geralmente se desenvolvem de forma simétrica em uma faixa de cerca de $\pm 20^\circ$ de latitude em torno do equador magnético. No entanto, em condições eletrodinâmicas

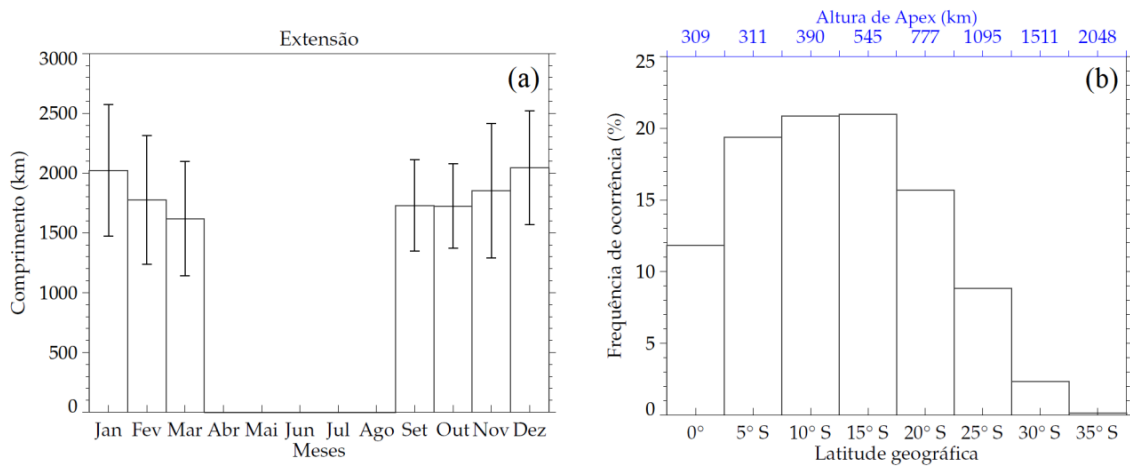
específicas, essas irregularidades também podem ocorrer em latitudes médias (SOBRAL et al., 1981, 2009; ABDU, 1993; CHERNIAK et al., 2016; 2019).

Um dos principais mecanismos que controlam o desenvolvimento latitudinal máximo das EPBs é a altura limite de deslocamento das perturbações de densidade, sendo esta governada pela deriva vertical do plasma ionosférico. Portanto, se as perturbações migrarem para altitudes mais elevadas, as EPBs poderão alcançar latitudes maiores. Esse processo está intrinsicamente ligado à configuração das linhas do campo geomagnético na altura limite de deslocamento das perturbações, normalmente representada em coordenadas magnéticas Apex (VANZANDT et al., 1972; RICHMOND, 1995).

Nesse contexto, o desenvolvimento das EPBs será maior (menor) quando a deriva vertical do plasma for mais (menos) rápida (HAERENDEL, 1973; RISHBETH, 2000; KELLEY, 2009). Em resumo, uma deriva vertical intensa possibilita que as EPBs atinjam alturas Apex elevadas, o que resulta em um maior desenvolvimento ao longo das linhas do campo geomagnético (MENDILLO; TYLER, 1983; ANDERSON; MENDILLO, 1983; ROHRBAUGH et al., 1989; BARROS, 2017).

A extensão latitudinal das EPBs ao sul do equador magnético, durante o período de 21 de novembro de 2012 a 31 de janeiro de 2016, é apresentada na Figura 2.7 (a) para a região da América do Sul. Além disso, é exibido o gráfico da frequência de ocorrência de EPBs em relação às latitudes geográficas e alturas Apex (b). O eixo horizontal superior, em destaque na cor azul, indica a altura Apex correspondente à frequência de ocorrência das EPBs em cada uma das faixas de latitude.

Figura 2.7 - Variação anual da extensão latitudinal (a) e frequência de ocorrência (b) em função de latitudes e alturas de Apex das EPBs, considerando o período entre 21 de novembro de 2012 e 31 de janeiro de 2016, para a América do Sul.



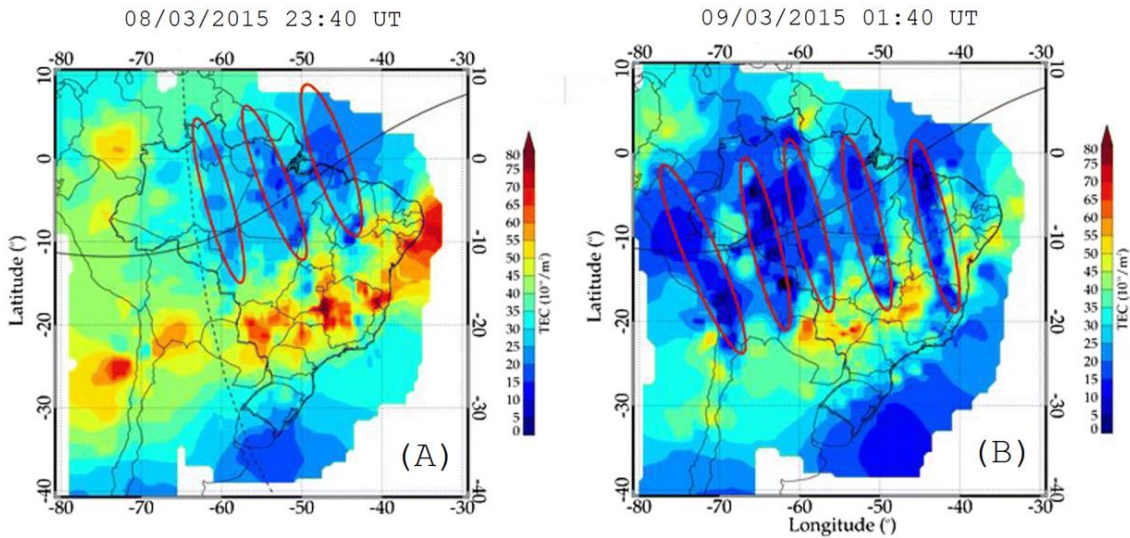
Fonte: Adaptado de Barros (2017).

A partir da Figura 2.7, Barros (2017) sugere que as maiores extensões latitudinais das EPBs ocorrem em dezembro e janeiro, diminuindo nos meses de fevereiro, março, setembro e outubro. Além disso, o autor afirma que o maior número de eventos de EPBs ocorre entre as latitudes 5°S e 20°S, embora seja esperado um maior número de EPBs no equador magnético. No entanto, a baixa intensidade dos valores de TEC em torno dessa região dificulta a identificação dos eventos. Contudo, o autor afirma que 88% dos eventos de EPBs se desenvolvem até 20°S em latitude e ~777 km em altura Apex.

Em relação à dinâmica das EPBs, observam-se velocidades de deriva zonal variando entre 50 e 200 m/s (SOBRAL et al., 1981; BARROS et al., 2017; CARMO, 2022). Nesse contexto, as EPBs geralmente apresentam uma periodicidade longitudinal, na qual observam-se eventos separados por distâncias variando entre 250 e 2250 km (HUANG et al., 2013; BARROS et al., 2017; TAKAHASHI et al., 2018; CARMO, 2023).

Na Figura 2.8 apresentam-se mapas de TEC sobre a América do Sul em (A) 08/03/2015 às 23:40 UT, e em (B) 09/03/2015 às 01:40 UT. A linha sólida representa o equador magnético, e a linha pontilhada indica a posição do terminador solar. A escala de cores representa a variação da densidade eletrônica, onde 1 TECU = 10^{16} elétrons/ m^2 . As elipses em vermelho destacam regiões de menor densidade eletrônica associadas às EPBs.

Figura 2.8 - Mapas de TEC sobre a América do Sul em (A) 08/03/2015 às 23:40 UT e em (B) 09/03/2015 às 01:40 UT.



Fonte: Adaptado de [Takahashi et al. \(2018\)](#).

É possível observar na Figura 2.8 eventos de EPBs em dois períodos distintos, porém dentro de um intervalo de 2 horas. No mapa da esquerda, são destacadas três regiões de depleções, com valores de TEC significativamente menores do que nas regiões adjacentes. Essas regiões estendem-se no plano meridional entre $\sim 15^{\circ}\text{S}$ e $\sim 5^{\circ}\text{N}$, indicando uma extensão latitudinal aproximada de 2220 km. Observa-se, ainda, que essas regiões não se propagam além das cristas da EIA. No mapa da direita, destacam-se cinco regiões de depleções, com valores de TEC significativamente menores do que nas regiões adjacentes. Essas regiões correspondem à evolução temporal dos eventos de bolhas de plasma apresentados no mapa anterior. Por fim, ressalta-se que a distância entre bolhas é menor no segundo caso (650 km) do que no primeiro (770 km), sendo essa uma característica da periodicidade das bolhas de plasma, conforme discutido por [Takahashi et al. \(2018\)](#).

A deriva zonal do plasma ionosférico é governada principalmente por campos elétricos originados pelos dínamos das Regiões E e F ([HAERENDEL et al., 1992](#)). Logo após o pôr do Sol, a Região E passa por uma rápida recombinação química. Nesse intervalo de tempo, a dinâmica da ionosfera passa a ser controlada pelo dínamo da Região F, que é gerado devido à ação do vento neutro zonal ([RISHBETH; GARRIOTT, 1969](#); [KELLEY, 2009](#)). Portanto, é esperado que os ventos neutros intensos façam com que o plasma (e,

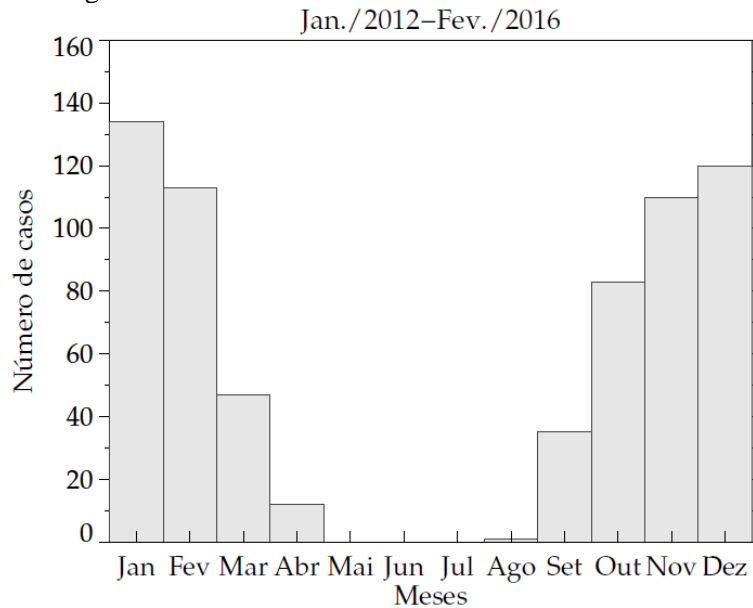
consequentemente, as EPBs) tenham uma maior velocidade de deriva zonal próximo ao equador magnético. Assim, a velocidade de deriva zonal das EPBs irá variar conforme a latitude, diminuindo quase linearmente desde 125 m/s no equador magnético até 65 m/s próximo a 35°S na América do Sul (BARROS, 2017). Consequentemente, surgirá um gradiente latitudinal na velocidade de deriva zonal das EPBs, que irá influenciar na inclinação dessas bolhas em relação às linhas do campo geomagnético, afetando também as distâncias entre bolhas. Nesse sentido, Barros (2017) afirma que quanto maior for o gradiente latitudinal da deriva zonal do plasma, maior será a inclinação das EPBs em relação às linhas de campo.

2.3.2 Variabilidade das EPBs em função de seus mecanismos geradores

O desenvolvimento das EPBs é influenciado diretamente pelas mudanças que ocorrem na eletrodinâmica do ambiente ionosférico, resultando em variações nas características morfológicas desses fenômenos devido a diversos fatores (ABDU, 1993; ABDU et al., 2005; BARROS et al., 2018; PIKANÇO et al., 2022; CARMO et al., 2023). Nesse sentido, sabe-se que as EPBs podem variar conforme a sazonalidade, atividade solar, dentre diversos outros determinantes.

No que diz respeito à variabilidade na ocorrência das EPBs, diversos estudos apontam para um número maior de eventos entre os meses de setembro e março na América do Sul (FEJER et al., 1999; ABDU et al., 2000). Além disso, esses eventos são mais frequentes durante períodos de alta atividade solar (SAHAI et al., 2000). Esse padrão pode ser observado na Figura 2.9, que representa a ocorrência média mensal de EPBs na Região Brasileira durante o período de janeiro de 2012 a fevereiro de 2016 (BARROS, 2017).

Figura 2.9 – Média mensal da ocorrência de EPBs entre janeiro de 2012 e fevereiro de 2016 na Região Brasileira.



Fonte: Barros (2017).

Um ponto importante a ser destacado é que a ocorrência de EPBs é significativamente maior nos meses de verão da região Brasileira, enquanto em outros setores (e. g. Peru), a maior ocorrência ocorre durante os equinócios. Esse comportamento pode ser justificado pela influência da declinação magnética sobre o dínamo da Região F e a variabilidade na velocidade de deriva vertical do plasma. A magnitude do gradiente longitudinal da condutividade Pedersen é significativamente afetada pelo grau de simultaneidade entre o terminador solar e o meridiano magnético, uma vez que essa configuração controla a diferença de tempo no horário do pôr do Sol em Regiões E conjugadas (BATISTA et al., 1986; ABDU et al., 1992). Em suma, ângulos pequenos entre o terminador solar e o meridiano magnético resultam em valores de gradiente de condutividade mais elevados em comparação com outros cenários de alinhamento, conforme destacado por Abdu et al. (1992).

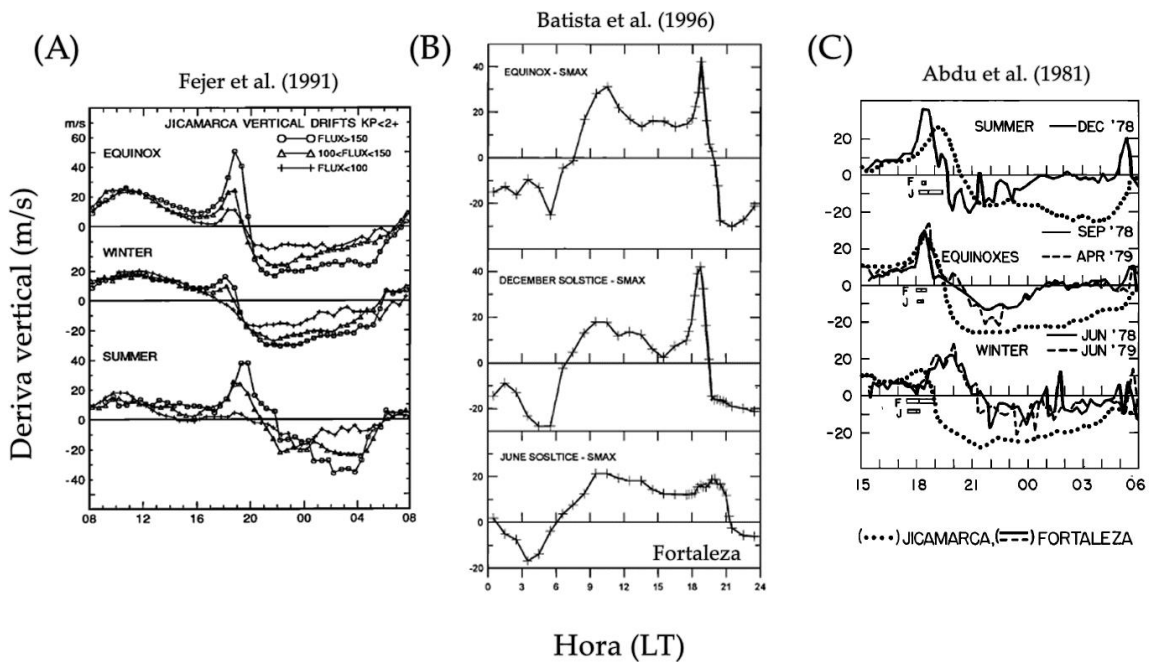
Outro fator que também pode afetar a taxa de ocorrência de EPBs é a atividade geomagnética. Nesse sentido, campos elétricos propagam-se da zona auroral até a ionosfera equatorial durante as tempestades geomagnéticas. Esses campos são geralmente direcionados para oeste durante o anoitecer, exceto quando a penetração de campos elétricos ocorre no horário do pôr do Sol. Assim, o campo elétrico para oeste (leste) faz

com que a Região F equatorial se desloque para baixo (cima), enfraquecendo (intensificando) o dínamo da Região F e inibindo (amplificando) a evolução da RTI (RASTOGI et al., 1981; WATANABE; OYA, 1986; ABDU, 1993; SINGH et al., 1997b; PALMROTH et al., 2000; CARMO et al., 2022).

De fato, as mudanças na eletrodinâmica do ambiente ionosférico podem afetar significativamente o desenvolvimento das EPBs. Nesse contexto, sabe-se que um dos principais mecanismos geradores dessas irregularidades é a deriva vertical do plasma, especialmente durante o PRE. Diversos estudos mostram que a intensidade do PRE pode ser influenciada de diversas maneiras, considerando fatores como a sazonalidade (BATISTA et al., 1986), a declinação magnética (ABDU et al., 1981) e a atividade solar (FEJER et al., 1979,1991; SANTOS et al., 2013), dentre outros.

Na Figura 2.10 são apresentados gráficos da variação da velocidade de deriva vertical da Região F em função da hora local. No painel à esquerda (A), estão ilustrados os resultados apresentados por Fejer et al. (1991). O painel do centro (B) contém resultados apresentados por Batista et al. (1996). Finalmente, o painel à direita (C) ilustra resultados apresentados por Abdu et al. (1981).

Figura 2.10 – Gráficos da variação da velocidade de deriva vertical da Região F em função da hora local. A: Resultados de Fejer et al. (1991). B: Resultados de Batista et al. (1996). C: Resultados de Abdu et al. (1981).



Fonte: Adaptado de [Fejer et al. \(1991\)](#), [Batista et al. \(1996\)](#) e [Abdu et al. \(1981\)](#).

[Fejer et al. \(1991\)](#) demonstraram que a velocidade do PRE tende a aumentar com a atividade solar, resultando em velocidades maiores (menores) durante a ocorrência de valores máximos (mínimos) de fluxo solar. Na Figura 2.10A observa-se que as velocidades de deriva vertical durante o PRE sobre Jicamarca ($-11,70^{\circ}\text{S}$, $-76,83^{\circ}\text{O}$) são maiores para valores de fluxo solar (F10.7) acima de 150 SFU (do inglês, *Solar Flux Unit*), intermediárias para valores entre 100 e 150 SFU e menores para valores abaixo de 100 SFU. Os autores demonstram, ainda, que as velocidades do PRE são influenciadas pela variação do fluxo solar em todos os períodos do ano.

[Batista et al. \(1996\)](#) destacam que a velocidade do PRE também apresenta um comportamento sazonal. Para isso, os autores analisaram dados da ionossonda localizada em Fortaleza ($-3,73^{\circ}\text{S}$, $-38,52^{\circ}\text{O}$) e compararam as médias da velocidade de deriva vertical obtidas para diferentes períodos. Na Figura 2.10B são ilustrados resultados desse estudo, em que os autores discutem que a velocidade do PRE tende a ser maior em meses de equinócio do que nos meses de solstício. Além disso, observa-se que a velocidade do

PRE também tende a ser maior durante os meses de verão em comparação com os meses de inverno.

[Abdu et al. \(1981\)](#) comparam as curvas mensais de variação da velocidade de deriva vertical obtidas para Jicamarca e Fortaleza (Figura 2.10C). Nesse estudo, os autores dedicam atenção especial à sazonalidade e à variabilidade da velocidade de deriva vertical em relação à declinação magnética. Nesse sentido, observa-se que as velocidades médias do PRE tendem a ser maiores sobre Fortaleza do que sobre Jicamarca, independente da estação do ano. Ressalta-se que o módulo da declinação magnética em Fortaleza é aproximadamente cinco vezes maior do que em Jicamarca. Esses resultados corroboram com a hipótese de que a deriva vertical do plasma seja fortemente influenciada pela declinação magnética, conforme observado previamente por [Batista et al. \(1986\)](#).

Com base nesses estudos, fica evidente que a velocidade do PRE é substancialmente influenciada pela sazonalidade, atividade solar e declinação magnética. Esse conjunto de informações proporciona uma sólida base teórica para estabelecer correlações entre as observações da morfologia das EPBs e os seus mecanismos geradores. Assim, torna-se essencial compreender as condições eletrodinâmicas da ionosfera no período que antecede a ocorrência das EPBs, uma vez que isso serve como um ponto de partida para aprofundar a investigação desses fenômenos, considerando a variabilidade física observada na ionosfera.

Outro ponto importante a ser discutido envolve a ocorrência de assimetrias no desenvolvimento inter-hemisférico das EPBs, uma vez que alguns fatores podem atenuar ou favorecer o seu desenvolvimento em um dos hemisférios magnéticos. Dentre esses fatores, a intensidade do vento termosférico transequatorial pode ser considerada um mecanismo capaz de modificar a taxa de crescimento das EPBs devido à redistribuição da condutividade Pedersen ao longo das linhas de campo geomagnético ([ZALESAK; HUBA, 1991; MENDILLO et al., 1992; BARROS, 2017](#)).

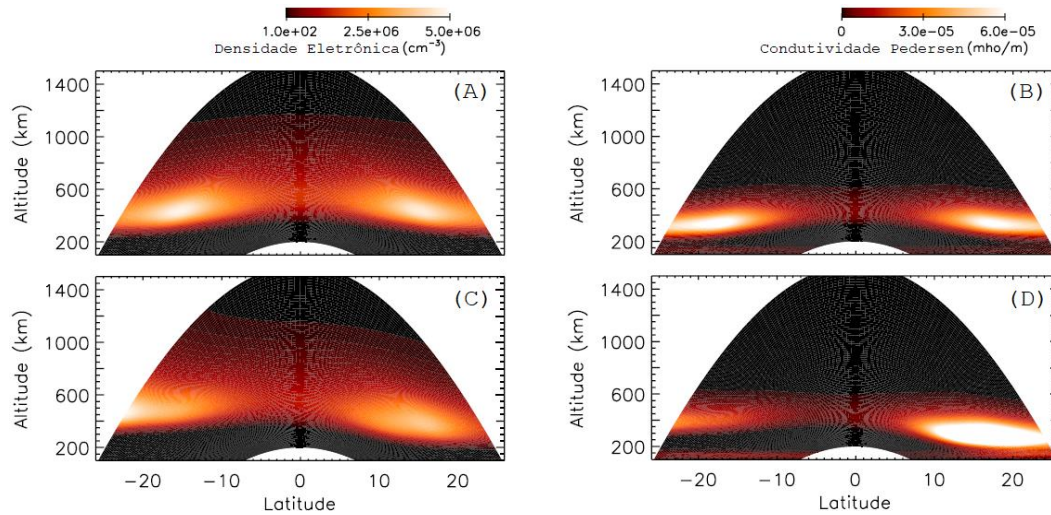
[Huba e Krall \(2013\)](#) discutem a influência dos ventos meridionais no desenvolvimento das EPBs. Os autores demonstraram que um perfil de vento com um gradiente positivo em relação à latitude ($\partial V_m / \partial \theta \geq 0$) favorece o desenvolvimento da RTI. Por outro lado, um perfil de vento com um gradiente negativo ($\partial V_m / \partial \theta \leq 0$) irá inibir o desenvolvimento das EPBs. De modo semelhante, [Carrasco et al. \(2017\)](#) afirmam que

ventos meridionais transequatoriais são capazes de inibir o desenvolvimento de EPBs no hemisfério oposto à origem do vento.

[Shiokawa et al. \(2002\)](#) e [Sobral et al. \(2009\)](#) destacam a notável simetria das EPBs em relação ao equador magnético. Isso ocorre devido ao campo elétrico de polarização gerado dentro das EPBs, que é mapeado simultaneamente para ambos os hemisférios ao longo das linhas do campo geomagnético. Portanto, é esperado que as EPBs exibam uma alta simetria. Por outro lado, [Su et al. \(2006\)](#) e [Sidorova \(2021\)](#) destacam a ocorrência de assimetrias inter-hemisféricas na extensão das EPBs. Adicionalmente, [Barros et al. \(2022\)](#) observaram que, em cerca de 70% das noites estudadas, as EPBs desenvolviam-se simetricamente em relação ao equador geomagnético. No entanto, em aproximadamente 30% das noites, apresentavam uma assimetria aparente. Usando dados e análises de simulação, os autores sugeriram que a presença de um vento meridional transequatorial para o norte (sul) poderia causar um deslocamento das EPBs para o norte (sul) do equador magnético.

Um exemplo dos resultados de um estudo sobre a influência de ventos termosféricos meridionais na variabilidade da ionosfera equatorial é apresentado na Figura 2.11. A figura exhibe gráficos de contorno de densidade eletrônica e condutividade Pedersen em um plano de latitude versus altitude. Os gráficos A e B representam um cenário sem ventos meridionais, enquanto os gráficos C e D incluem a presença de ventos meridionais de 60 m/s. Essas condições são representativas de intervalos imediatamente anteriores à ocorrência de EPBs.

Figura 2.11 - Gráficos de contorno de densidade eletrônica e condutividade Pedersen em um plano de latitude ($^{\circ}$) versus altitude (km) para um cenário sem ventos meridionais (A e B) e com ventos meridionais de 60 m/s (C e D).



Fonte: Adaptado de [Krall et al. \(2009\)](#).

No contexto da Figura 2.11, [Krall et al. \(2009\)](#) sugerem que o vento meridional dirigido para norte faz com que a crista sul da EIA seja elevada (painel C), ao passo que a crista norte é rebaixada. O mesmo comportamento é observado na disposição das condutividades Pedersen (painel D), na qual ocorre uma redistribuição. Devido a essa reconfiguração, a taxa de crescimento das EPBs é atenuada tanto no plano meridional como no vertical. Nesse sentido, os autores afirmam que os ventos meridionais dirigidos para o norte (sul) são capazes de atenuar o desenvolvimento das EPBs ao sul (norte) do equador magnético e promover o desenvolvimento das EPBs no norte (sul). No entanto, é esperado que a taxa de crescimento das bolhas de plasma não sofra alterações sobre o equador magnético ([MARUYAMA, 1988](#); [BARROS, 2017](#)).

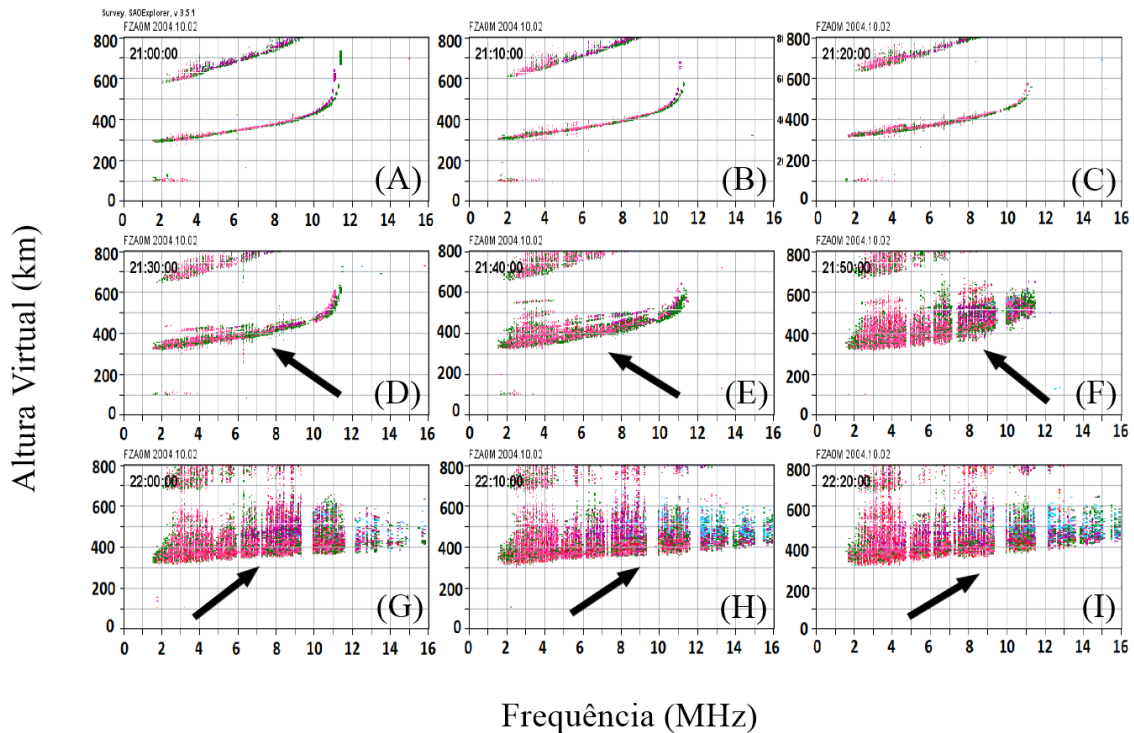
2.4 Técnicas de observação das EPBs

A literatura científica aborda a utilização de diversos métodos no estudo das EPBs, em que pese as vantagens e desvantagens de cada um. Dentre eles, destaca-se o uso de ionossondas, imageadores All-Sky, radares de espalhamento, dados de TEC e índices ionosféricos ([ROSS; ERAMLEY, 1949](#); [VALENTIM, 2015](#); [PAULINO et al., 2011](#); [TAKAHASHI et al., 2015, 2016](#); [DENARDINI et al., 2020b](#), [PICANÇO et al., 2022](#); [CARMO et al., 2022](#)).

A ionossonda é um instrumento amplamente utilizado para monitorar o comportamento da ionosfera em diversas faixas de altitude. Este equipamento consiste em um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética em uma faixa de frequências variando de 1 a 30 MHz. Os registros da ionossonda são conhecidos como ionogramas, que representam graficamente a altura “virtual” de reflexão dos pulsos transmitidos nas diferentes camadas ionosféricas em relação à frequência do sinal emitido (REINISCH, 1986). Esses instrumentos proporcionam uma medida direta dos efeitos ionosféricos observados em sinais de rádio, permitindo identificar a assinatura das EPBs, a qual é denominada Spread-F. Por outro lado, as ionossondas são equipamentos estáticos que demandam um alto investimento, e que são capazes de mensurar apenas a parte inferior da ionosfera, uma vez que seu princípio de funcionamento é baseado na estimativa dos parâmetros de reflexão de pulsos eletromagnéticos em uma faixa de frequência conhecida (BATISTA et al., 1996; RESENDE et al., 2019; SANTOS et al., 2022).

Na Figura 2.12 apresenta-se uma sequência de ionogramas obtidos entre 21:00 UT e 22:20 UT do dia 02 de fevereiro de 2004, utilizando dados da ionossonda localizada em Fortaleza (FZA0M, -3,71°S, -38,54°O). Nos painéis de ‘A’ a ‘C’ observa-se que as alturas virtuais de reflexão dos pulsos das ionossondas estão bem definidas, o que permite obter com maior precisão os parâmetros ionosféricos derivados dos ionogramas. No entanto, a partir das 21:30 UT (painel D), é perceptível um aumento significativo da dispersão dos pontos amostrais. Essa dispersão está relacionada à ocorrência de Spread-F, que se intensifica com o decorrer do tempo, conforme observado nos painéis de ‘D’ a ‘I’ (setas na cor preta). Embora esse comportamento prejudique o cálculo dos parâmetros das camadas ionosféricas (e.g. $h'F$ e f_{of2}) (VALENTIM, 2015), a presença de espalhamento nos ionogramas indica a presença de irregularidades do plasma, sendo relevante como uma medida local dos efeitos das EPBs.

Figura 2.12 – Sequência de ionogramas obtidos a partir de dados da ionossonda localizada em Fortaleza (FZAOM, -3,71°S, -38,54°O), entre 21:00 UT e 22:20 UT do dia 02 de fevereiro de 2004. As setas pretas indicam a presença de espalhamento (Spread-F) nos pulsos transmitidos pela ionossonda.



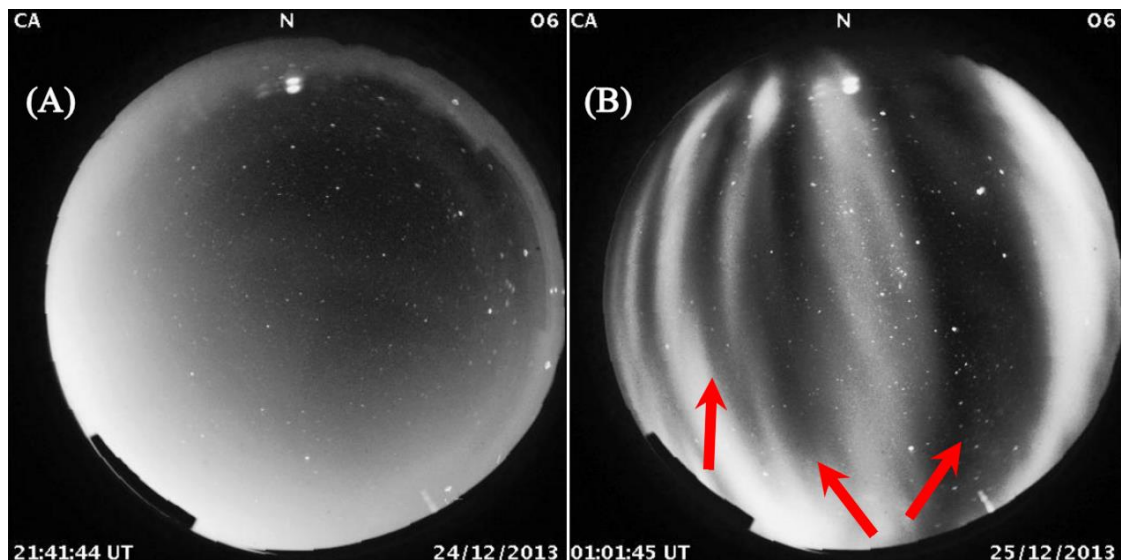
Fonte: Adaptado de [Valentim \(2015\)](#).

Outra técnica bastante utilizada para o estudo das EPBs é o uso de dados de emissões de aeroluminescência noturna obtidos por meio de imageadores All-Sky ([PAULINO et al., 2011](#); [TAKAHASHI et al., 2015](#)). Embora altamente precisos, esses instrumentos apresentam certa restrição no que diz respeito às condições necessárias para seu melhor funcionamento. Dessa forma, a utilização dos ASI para o estudo das EPBs demanda a ausência de fontes intensas de iluminação artificial e natural (e.g. lua cheia), bem como a cobertura de nuvens ([WIENS et al., 2006](#)). Os ASI são capazes de medir as emissões de aeroluminescência noturna em diferentes faixas de comprimentos de onda. Esses instrumentos são amplamente utilizados para observações da alta atmosfera, onde as emissões do oxigênio na faixa de 630 nm (OI-630) fornecem informações importantes sobre os processos que ocorrem no sistema termosfera-ionosfera desde a região equatorial até a de altas latitudes ([MARTINIS et al., 2018](#)). As emissões obtidas nessa faixa de comprimentos de onda ocorrem principalmente como resultado da desexcitação do

oxigênio atômico no estado (1D). Durante a excitação, um átomo de oxigênio absorve energia e seus elétrons são impulsionados para níveis de energia mais altos. Essa energia é liberada posteriormente quando os elétrons retornam aos seus níveis de energia originais. Na ionosfera, esse processo está fortemente relacionado à formação das EPBs. Portanto, os ASI são instrumentos capazes de detectar as assinaturas características das bolhas de plasma, bem como sua evolução espacial e temporal (PROL et al., 2018).

Na Figura 2.13 apresenta-se um exemplo de duas imagens obtidas por um ASI instalado em São João do Cariri (CA, -7,39°S, -36,53°O). No painel esquerdo (A), observa-se uma imagem do céu noturno sobre a estação ASI, onde não é observada a ocorrência de EPBs. No painel direito (B), são detectadas EPBs, que surgem na forma de “franjas” (setas vermelhas) com coloração mais escura em relação às adjacências. Nessas regiões, a densidade do plasma ionosférico é relativamente menor. As imagens foram obtidas entre 24 e 25 de dezembro de 2013, com um intervalo aproximado de 3h20min entre ambas. Adicionalmente, ressalta-se que em ambas as imagens foi utilizado o filtro para as emissões do OI-630.

Figura 2.13 – Exemplos de imagens sem (A) e com (B) a presença de EPBs, obtidas utilizando o ASI localizado em São João do Cariri (CA, -7,39°S, -36,53°O) entre 24 e 25 de dezembro de 2013. As setas vermelhas indicam assinaturas de EPBs.



Fonte: Adaptado de Barros (2017).

Os radares de espalhamento coerente e incoerente têm sido utilizados no estudo das EPBs como uma alternativa precisa às ionossondas, uma vez que estas apresentam fortes efeitos

da recombinação química da ionosfera noturna (FEJER et al., 1996). Nesse contexto, Batista et al. (1986) afirmam que as medidas de deriva vertical do plasma obtidas utilizando dados de ionossonda tendem a ser subestimadas durante o período noturno, especialmente quando a altura da Região F é inferior a 300 km, conforme observado por Bittencourt e Abdu (1981). Batista et al. (1986) afirmam, ainda, que dados obtidos utilizando radares demonstram maior precisão nesse aspecto. Dessa forma, é notável que radares de espalhamento ofereçam maior precisão e detalhamento da ionosfera, porém a um custo mais elevado do que as ionossondas. De fato, um número considerável de estudos encontrados na literatura científica utilizam dados de radares e ionossondas para a análise das assinaturas de plumas de radares e Spread-F. No entanto, ressalta-se a importância de se ter dados confiáveis para o conhecimento preciso das condições ionosféricas que precedem o desenvolvimento das EPBs (RESENDE et al., 2019).

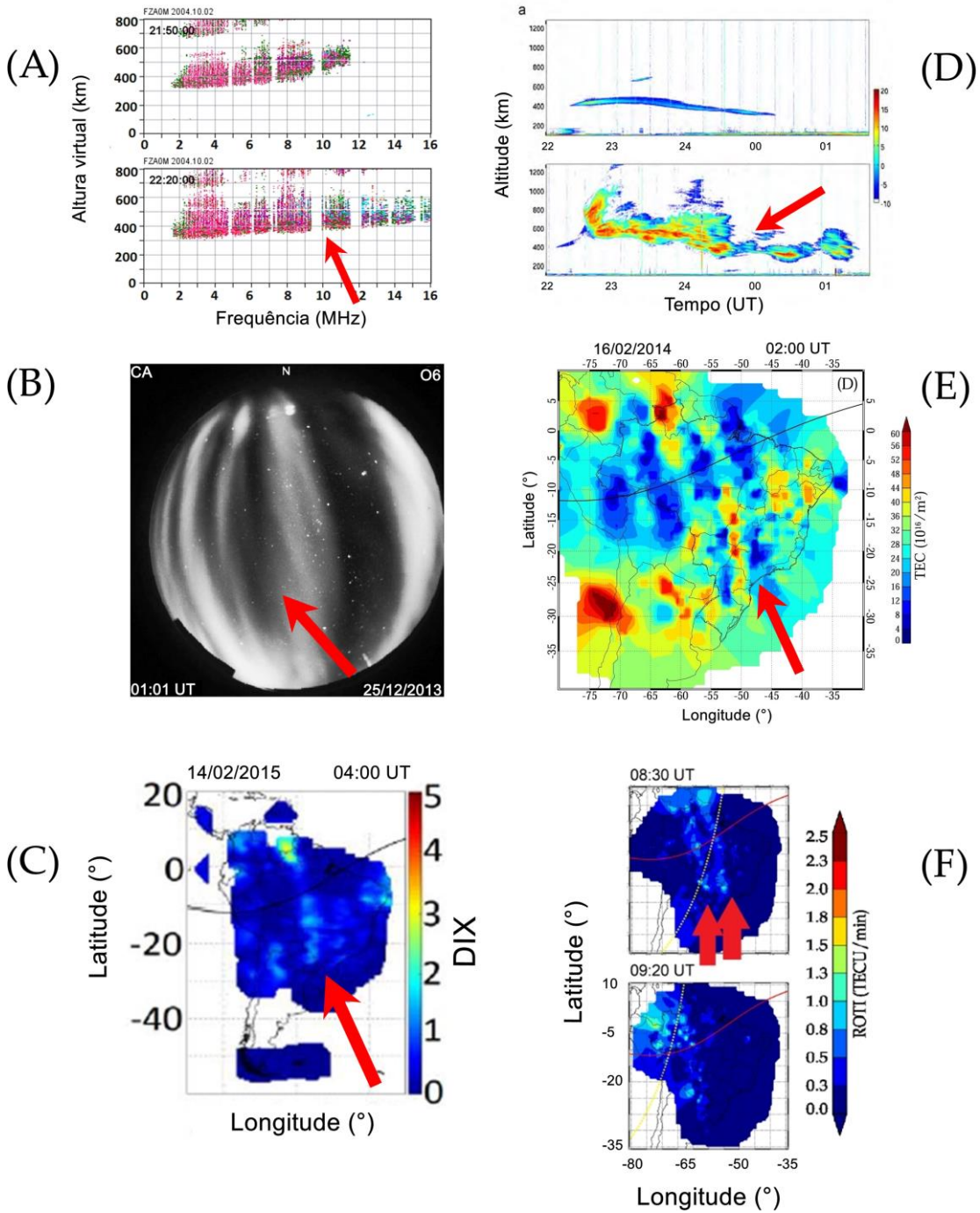
A análise de dados de TEC obtidos utilizando dados de sistemas GNSS é uma técnica amplamente utilizada para o estudo de EPBs. Uma grande vantagem deste método é a sua facilidade de implementação, uma vez que as estações GNSS são consideravelmente mais baratas do que outros instrumentos, tais como ionossondas e ASI. Por outro lado, o grau de detalhamento dessa técnica é proporcional à quantidade de estações GNSS disponíveis. Nesse contexto, diversos estudos demonstram certa restrição para o uso desta técnica em regiões com um número insuficiente de estações (TAKAHASHI et al., 2016; BARROS, 2017).

O uso de índices ionosféricos permite um aprimoramento das técnicas de análise de EPBs baseadas em dados de TEC. Nesse sentido, é crescente o número de estudos publicados demonstrando que o uso de índices ionosféricos (CARMO et al., 2021; PICANÇO et al., 2022) em conjunto com diferentes combinações de dados GNSS (MENDOZA et al., 2019) pode contribuir para uma melhor cobertura de dados ionosféricos, o que representa um aprimoramento nas metodologias de estudo das EPBs, bem como uma tendência crescente no número de novas técnicas (RESENDE et al., 2019; DENARDINI et al., 2020a; CARMO et al., 2021; PICANÇO et al., 2022).

Na Figura 2.14 apresentam-se exemplos de assinaturas características de EPBs utilizando diferentes técnicas e instrumentos, tais como ionossondas (A), ASI (B), mapa do índice DIX (C), radar VHF (D), mapa de TEC (E) e mapas do índice ROTI (F). As setas

vermelhas em cada um dos painéis indicam a ocorrência de EPBs. Nos dados de ionossonda, nota-se que a assinatura específica das EPBs ocorre por meio do Spread-F, que é definido como o espalhamento do sinal eletromagnético em regiões com diferentes índices de refração ionosférica (SANTOS, 2013). As assinaturas típicas das EPBs nos dados de ASI são definidas como “franjas”, nas quais a emissão do oxigênio atômico na faixa de 630 nm é significativamente menor (BARROS, 2017). Adicionalmente, no índice DIX as EPBs são detectadas sob a forma de perturbações ionosféricas meridionais, presentes em ambos os hemisférios magnéticos (BARBOSA-NETO, 2020). Dados de radar mostram as assinaturas de EPBs sob a forma de “plumas ionosféricas”, as quais se manifestam em diferentes altitudes (CUEVA, 2013). Em adição, mapas de TEC exibem depleções do plasma, as quais estão diretamente associadas com variações do índice de refração da ionosfera, ocasionando em diferenças de tempo na propagação de sinais GNSS (TAKAHASHI et al., 2016). Finalmente, o índice ROTI exhibe regiões de maior variabilidade temporal do TEC, estando estas frequentemente alinhadas ao campo geomagnético (CARMO, 2022).

Figura 2.14 – Exemplos de assinaturas de EPBs observadas usando diferentes técnicas e instrumentos: ionossonda (A), ASI (B), mapa do índice DIX (C), radar VHF (D), mapa de TEC (E) e mapas do índice ROTI (F). As setas vermelhas em cada um dos painéis indicam a ocorrência de EPBs.



Fonte: Adaptado de Santos (2013), Barros (2017), Barbosa-Neto (2020), Cueva (2013), Takahashi et al. (2016) e Carmo (2022).

2.5 Resultados recentes e tópicos em aberto sobre o estudo de EPBs

As EPBs têm sido amplamente estudadas desde a primeira metade do século XIX, como se pode atestar pela vasta quantidade de estudos encontrados na literatura científica (ROSS; ERAMLEY, 1949; DUNGEY, 1956; HINES, 1960; HAERENDEL, 1973; HUDSON; KENNEL, 1975; SOBRAL et al., 1981; ABDU, 1993). No entanto, é relevante mencionar que este tema está longe de ter sido completamente explorado.

Novas técnicas de análise dos eventos de EPBs têm sido propostas com certa frequência nos últimos anos (DENARDINI et al., 2020a; HUBA; LIU, 2020; CARMO et al., 2021; PICANÇO et al., 2022). Além disso, há diversos aspectos das EPBs que demandam maior atenção, uma vez que inúmeras questões relacionadas a esse tema permanecem em aberto. Por exemplo, um estudo recente realizado por Barros et al. (2022) investigou as assimetrias inter-hemisféricas observadas em eventos de EPBs na região brasileira. Os autores observaram que ventos meridionais trans-equatoriais soprando para o norte (sul) podem causar um deslocamento das EPBs para o norte (sul) do equador magnético. Por outro lado, existem estudos tratando sobre assimetrias inter-hemisféricas observadas em eventos de EPBs que mostram resultados divergentes (CARRASCO et al., 2017). Abdu et al. (2009) demonstra que ambos os cenários mostrados nesses estudos são coerentes, contudo, nota-se uma carência de um estudo compreensivo que avalie essas características levando em consideração a variabilidade de seus mecanismos geradores em diferentes cenários eletrodinâmicos. Em adição, o desenvolvimento de novas metodologias para o estudo das irregularidades do plasma (RESENDE et al., 2019; CARMO et al., 2021) mostra que novas características físicas das EPBs podem ser estudadas utilizando ferramentas mais precisas.

Outro aspecto que requer uma investigação mais aprofundada é o estudo da influência da atividade geomagnética sobre a modulação da ocorrência das EPBs. Essa análise visa estabelecer um parâmetro de comparação para avaliar a competição entre os campos elétricos perturbados e os mecanismos geradores no processo de desenvolvimento ou supressão das EPBs. Além disso, é igualmente relevante buscar uma compreensão da periodicidade na ocorrência das bolhas de plasma, visando aperfeiçoar as técnicas de previsão.

[Makela et al. \(2010\)](#) e [Choi et al. \(2017\)](#) realizaram estudos abordando a periodicidade das EPBs. No primeiro estudo, os autores avaliaram o espaçamento entre as bolhas de plasma para tentar encontrar um padrão que estivesse de acordo com a teoria da geração de ondas de gravidade. No segundo estudo, realizou-se uma análise do padrão de ocorrência de EPBs para tentar identificar um comportamento periódico. [Makela et al. \(2010\)](#) sugeriram que as propriedades espaciais de um dado mecanismo de disparo, tal como as ondas de gravidade, são refletidas no espaçamento das EPBs. [Choi et al. \(2017\)](#) afirmaram que não há uma periodicidade dominante que represente as características de ondas planetárias no espaçamento entre EPBs. Isso sugere que a ocorrência das bolhas é geralmente irregular, podendo ocorrer de forma quase periódica sem um mecanismo gerador conhecido.

As dificuldades encontradas para determinar a periodicidade diária das bolhas de plasma, bem como a periodicidade da geração local em uma única noite, são diversas. Isso se deve ao fato de que o ambiente espacial está sujeito a agentes externos, tais como a penetração de campos elétricos, campos elétricos do dínamo perturbados, variações na densidade do plasma pré-pôr do Sol devido a explosões solares (do inglês, *solar flares*), influências do ciclo e da rotação solar, dentre outros. Além disso, existem fatores internos, tais como a presença de ondas planetárias com periodicidades distintas e perturbações ionosféricas propagantes, dentre outros ([SOBRAL et al., 1981, 2009](#); [ABDU, 1993](#); [CHERNIAK et al., 2019](#); [CARMO et al., 2022, 2023](#)).

De fato, existem vários tópicos que demandam atenção no estudo das EPBs. Sendo assim, é essencial compreender, *a priori*, a variabilidade desses fenômenos durante períodos de baixa atividade geomagnética, uma vez que a ionosfera tende a mostrar variações cíclicas que ainda não são completamente conhecidas.

3 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: GPS, GLONASS, GALILEO E BEIDOU

Neste capítulo são apresentados conceitos fundamentais sobre os Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS). Em particular, é dada ênfase à compreensão das características dos sinais GNSS aplicados à metodologia de cálculo de TEC utilizada neste trabalho. Na Seção 3.1 apresenta-se uma visão geral sobre os sistemas GNSS. Para isso, é feita uma breve descrição das principais constelações globais de satélites, tendo como foco os sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. Em seguida, a Seção 3.2 apresenta um resumo detalhado do segmento espacial de cada um dos sistemas GNSS abordados neste capítulo. Adicionalmente, esta seção descreve os principais sinais transmitidos pelos satélites de cada constelação, tendo como foco a compreensão da estrutura de dados necessária para a aplicação da metodologia de cálculo de TEC utilizada. A Seção 3.3 apresenta informações sobre o formato de arquivos de observáveis GNSS, assim como o segmento de usuários. Finalmente, a Seção 3.4 descreve o formato dos arquivos de órbitas dos satélites GNSS, juntamente com uma breve descrição do segmento de controle dos sistemas apresentados neste capítulo.

3.1 Visão geral sobre os sistemas GNSS

Os sistemas GNSS constituem-se basicamente de uma rede de satélites em órbita, juntamente com receptores e estações de monitoramento terrestre. Esses sistemas foram desenvolvidos com o objetivo primário de informar a posição instantânea do receptor em um determinado sistema de referência, utilizando para isso as informações de posição dos satélites ([PARKINSON; SPILKER, 1996](#)).

Com a difusão dos sistemas GNSS, diversas outras funcionalidades foram atribuídas ao seu uso. Dentre elas, destaca-se a estimativa do vapor de água integrado (IWV, do inglês *Integrated Water Vapor*), que consiste no cálculo aproximado da quantidade total do vapor de água presente na coluna atmosférica entre um receptor em Terra e um satélite em órbita, sendo amplamente utilizado em estudos meteorológicos ([CALORI et al., 2016](#); [SAPUCCI, 2014](#); [BIANCHI et al., 2016](#); [VAQUERO-MARTÍNEZ et al., 2018](#); [ARAGÓN PAZ et al., 2023](#)). Outro importante parâmetro que pode ser obtido utilizando dados de sistemas GNSS é o TEC ionosférico, que consiste em uma aproximação do número total de elétrons ao longo de uma coluna cilíndrica com seção transversal reta de

1m², tendo como extremidades um receptor terrestre e um satélite em órbita (KERSLEY, 2004).

Dentre os sistemas GNSS existentes, destacam-se os seguintes, considerando sua disponibilidade de dados e número de estações receptoras: o sistema GPS (do inglês *Global Positioning System*), pertencente aos EUA, o GLONASS (do russo *GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), pertencente à Rússia, o Galileo, pertencente à União Europeia e o BeiDou, pertencente à China. Atualmente, os sistemas GPS e Galileo proporcionam juntos aproximadamente 72% dos dados de GNSS disponíveis sobre a região da América do Sul, seguidos pelo GLONASS e o BeiDou, os quais correspondem a 19% e 9% dos dados disponíveis, respectivamente (MENDOZA et al., 2019). Adicionalmente, existem outros sistemas de posicionamento por satélite que se encontram atualmente em fase de implementação, possuindo também outro tipo de classificação, como o Sistema Regional de Navegação por Satélite Indiano (IRNSS/NavIC, do inglês *Indian Regional Navigation Satellite System*) e o Sistema de Satélite Quase-Zenital (QZSS, do inglês *Quasi-Zenith Satellite System*), pertencente ao Japão (LANGLEY et al., 2017).

Conforme mencionado, a estrutura dos sistemas GNSS consiste basicamente em três elementos principais: o segmento espacial, que corresponde à constelação de satélites, o segmento de controle, que inclui as estações de monitoramento e o segmento de usuários, que diz respeito aos dispositivos receptores (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, MONICO, 2008). Nas seções a seguir esses conceitos serão apresentados em maiores detalhes.

3.2 Segmento espacial e características dos sinais GNSS

O segmento espacial é um componente essencial dos sistemas GNSS, consistindo em uma constelação de satélites em órbita ao redor da Terra. Esses satélites transmitem sinais contendo informações relacionadas à posição do satélite em um sistema de referência geocêntrico, bem como parâmetros de propagação do sinal. Os sinais são recebidos por receptores fixos e móveis, localizados na superfície terrestre. Cada sistema GNSS tem uma configuração específica de satélites, posicionados estrategicamente para fornecer uma melhor cobertura global. A precisão e a disponibilidade dos dados de

posicionamento dependem do número e da distribuição dos satélites no segmento espacial de cada sistema GNSS.

3.2.1 GPS

O segmento espacial do sistema GPS consiste em, no mínimo, 24 satélites em órbita circular média (MEO, do inglês *Medium Earth Orbit*), com raio orbital de aproximadamente 26.559 km (HEGARTY, 2017). Esses satélites encontram-se distribuídos em seis planos orbitais circulares com um ângulo de 55 graus de inclinação em relação ao plano equatorial. Cada plano inclui quatro satélites igualmente espaçados em altitude aproximada de 20.200 km em relação à superfície terrestre e 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. Portanto, espera-se que cada satélite visite o mesmo ponto duas vezes dentro de um período aproximado de 24 horas. Ressalta-se que nos últimos anos a constelação GPS tem sido expandida, onde os satélites adicionais são inseridos em espaços expansíveis dentro da configuração orbital da constelação GPS. Desde o início do programa GPS, em 1978, até os dias atuais, 67 satélites GPS foram lançados, onde 32 encontram-se em estado operacional. Esses satélites têm sido desenvolvidos em blocos, onde cada bloco corresponde a uma determinada classe de satélites, conforme apresentado na Tabela 3.1:

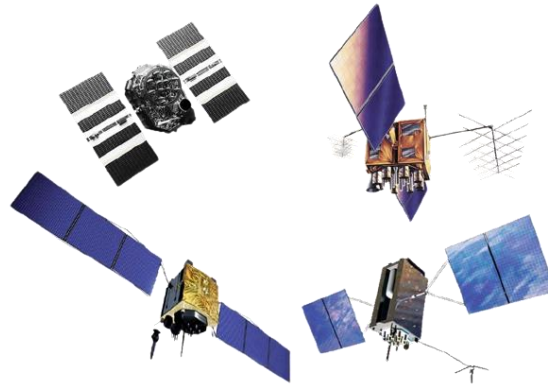
Tabela 3.1 – Descrição dos blocos de lançamento dos satélites da constelação GPS.

Parâmetro	Bloco I	Bloco II/IIA	Bloco IIR/IIR-M	Bloco IIF	GPS III
Primeiro lançamento	1978	1989	1997	2010	2017
Expectativa de duração	5 anos	7,5 anos	7,5 anos	12 anos	15 anos
Número de satélites (previsto)	11	28	21	12	2-12

Fonte: Adaptado de Hegarty (2017).

Na Figura 3.1 apresenta-se uma ilustração dos satélites da constelação GPS. Estão apresentados os diferentes tipos de satélites, incluindo os pertencentes ao Bloco IIA (topo esquerdo), Bloco IIR (topo direito), Bloco IIF (inferior esquerdo) e GPS III (inferior direito).

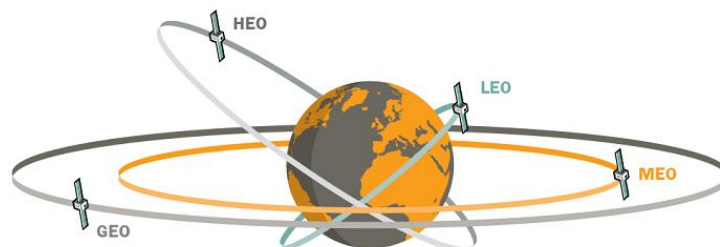
Figura 3.1 - Ilustração dos satélites da constelação GPS: Bloco IIA (topo esquerdo), Bloco IIR (topo direito), Bloco IIF (inferior esquerdo), e GPS III (inferior direito).



Fonte: Adaptado de [Hegarty \(2017\)](#).

A Figura 3.2 representa a configuração da órbita MEO ao redor do globo terrestre, juntamente com as órbitas geostacionária (GEO, do inglês *Geosynchronous Equatorial Orbit*), baixa (LEO, do inglês *Low Earth Orbit*) e elíptica alta (HEO, do inglês *Highly Elliptical Orbit*). Nesse contexto, a órbita LEO corresponde à região do espaço entre 200 e 2000 km de altitude, a órbita MEO corresponde à região entre 2000 e 35.786 km de altitude e a órbita GEO à altitude de aproximadamente 35.786 km.

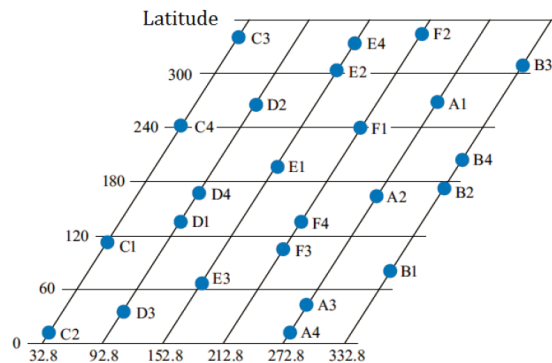
Figura 3.2 - Representação esquemática das órbitas LEO, MEO e GEO ao redor da Terra.



Fonte: [Everything RF \(2018\)](#).

A Figura 3.3 ilustra um exemplo de configuração dos satélites GPS dentro do plano de órbitas. Nesta, estão identificados os 6 planos orbitais: A, B, C, D, E e F. Também estão indicados possíveis *slots* associados às posições dos satélites, representados pelos símbolos em azul. Observa-se que os satélites se encontram assimetricamente espaçados dentro dos planos orbitais. Isso ocorre devido ao fato de que a configuração orbital GPS foi desenvolvida de modo a evitar problemas ocasionados por falhas pontuais.

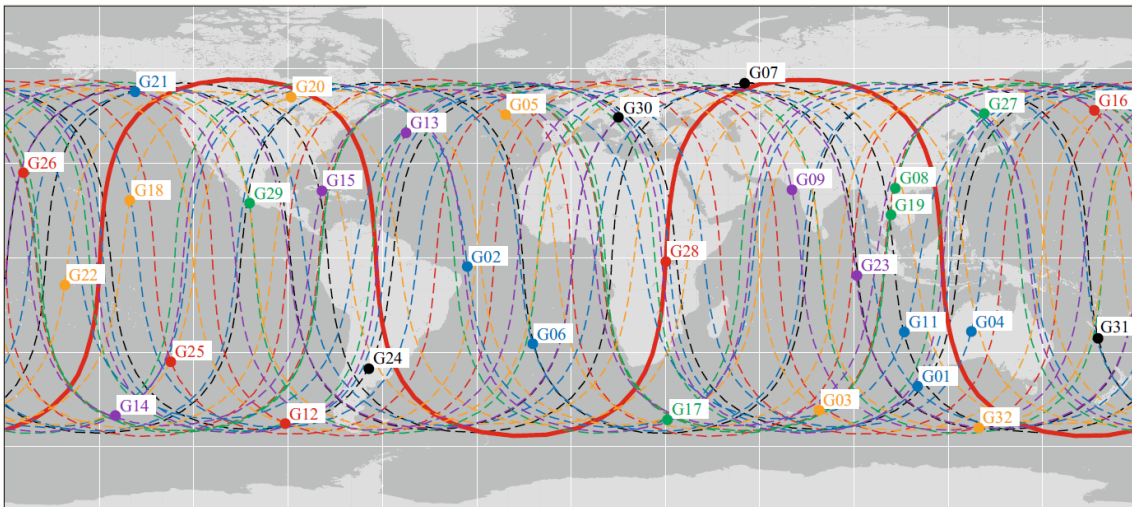
Figura 3.3 - Esquema ilustrando a distribuição de satélites GPS (símbolos azuis) dentro de quatro slots de cada plano orbital.



Fonte: Adaptado de [Hegarty \(2017\)](#).

Na Figura 3.4 apresenta-se um mapa ilustrando as trajetórias terrestres (do inglês *ground tracks*) dos satélites GPS durante as 24 horas do dia 01/09/2015. Essas trajetórias representam as projeções das órbitas dos satélites no plano cartográfico, considerando inicialmente um sistema de coordenadas geocêntrico (ECEF, do inglês *Earth-centered, Earth-fixed*). Cada cor representa as trajetórias diárias dos satélites nos seis planos orbitais (preto: A, vermelho: B, verde: C, azul: D, laranja: E, violeta: F). Cada satélite recebe um código de identificação, onde o prefixo ‘G’ representa a constelação GPS e os dígitos numéricos representam o identificador do satélite, entre 1 e 32.

Figura 3.4 - Mapa das trajetórias terrestres dos satélites da constelação GPS durante as 24 horas do dia 01/09/2015. Os planos orbitais são representados por cores distintas (preto: A, vermelho: B, verde: C, azul: D, laranja: E, violeta: F).



Fonte: Hegarty (2017).

Diante das informações de trajetórias apresentadas na Figura 3.4, observa-se que a configuração orbital da constelação GPS proporciona uma boa cobertura em todos os continentes, independente da longitude. Contudo, em regiões de altas latitudes a cobertura de satélites é drasticamente reduzida.

Características dos sinais GPS

Cada satélite GPS da constelação GPS é capaz de transmitir um conjunto de sinais, modulado nas seguintes bandas de frequência:

- L1 (1575.42 MHz)
- L2 (1227.60 MHz)
- L5 (1176.45 MHz)

As bandas de frequência L1 e L2 são utilizadas desde o início do projeto GPS (1978, Satélites do Bloco I), enquanto a banda L5 foi introduzida a partir de 2010 (Satélites do Bloco IIF) (HEGARTY, 2017). Essas bandas são geralmente denominadas como ondas portadoras e são utilizadas para modular diversos tipos de sinais de navegação, que são utilizados primariamente no cálculo do posicionamento, também podendo ser utilizado em diversas aplicações científicas (PI et al., 1997; JAKOWSKI et al., 2006, 2012).

A Tabela 3.2 apresenta uma visão geral dos sinais modulados nas bandas L1, L2 e L5 do sistema GPS, classificados de acordo com os canais de transmissão utilizados.

Tabela 3.2 - Resumo dos principais sinais modulados nas bandas L1, L2 e L5 do sistema GPS.

Banda/Portadora	Sinal	Canais
L1	C1	C, S, L, P, W, Y, M, X (D+P)
	L1	C, S, L, P, W, Y, M, N, X (D+P)
	D1	C, S, L, P, W, Y, M, N, X (D+P)
	S1	C, S, L, P, W, Y, M, N, X (D+P)
L2	C2	C, D, S, L, P, W, Y, M, X (M+L)
	L2	C, D, S, L, P, W, Y, M, N, X (M+L)
	D2	D, S, L, P, W, Y, M, N, X (M+L)
	S2	D, S, L, P, W, Y, M, N, X (M+L)
L5	C5	I, Q, X (I+Q)
	L5	I, Q, X (I+Q)
	D5	I, Q, X (I+Q)
	S5	I, Q, X (I+Q)

Fonte: Adaptado de [Romero \(2021\)](#).

Os sinais GPS são identificados de acordo com um código alfanumérico de até três caracteres, denominado ‘TNA’, onde o primeiro caractere descreve o tipo de observação, dentre eles ([ROMERO, 2021](#)):

- C: Pseudodistância (metros)
- L: Fase da portadora (ciclos)
- D: Variação da frequência da portadora devido ao efeito Doppler (Hz)
- S: Índice de intensidade do sinal (escala de 1 a 9)

O segundo caractere (numérico) representa a banda de frequência, sendo 1 (L1), 2 (L2) ou 5 (L5) para o caso do GPS. Finalmente, o terceiro caractere representa o canal de transmissão do sinal, descrito conforme a Tabela 3.2.

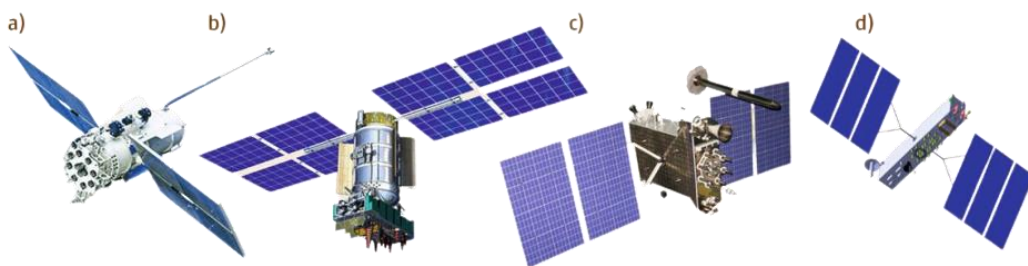
Dessa forma, é possível descrever o sinal observado de acordo com os três caracteres do código TNA. Por exemplo, o código C2C representa a pseudodistância obtida por meio do canal C da banda L2 e L2W representa a medida de fase obtida através do canal W da portadora L2.

3.2.2 GLONASS

O segmento espacial do sistema GLONASS consiste em pelo menos 24 satélites operacionais distribuídos em órbitas MEO ao longo de três planos com inclinação de $\sim 65^\circ$ entre si (REVNIVYKH et al., 2017). Esses satélites têm sido constantemente desenvolvidos e lançados desde a década de 1980. Até o presente momento, seis conjuntos de satélites foram lançados, classificados da seguinte forma: Série I (1982), Série M (2003), Série K1 (2012), Série M+ (2014), Série K2 (2016) e Série K1+ (2017).

Na Figura 3.5 apresenta-se uma ilustração dos modelos de satélites GLONASS: Série I (a), Série M/M+ (b), Série K1/K1+ (c), e Série K2 (d).

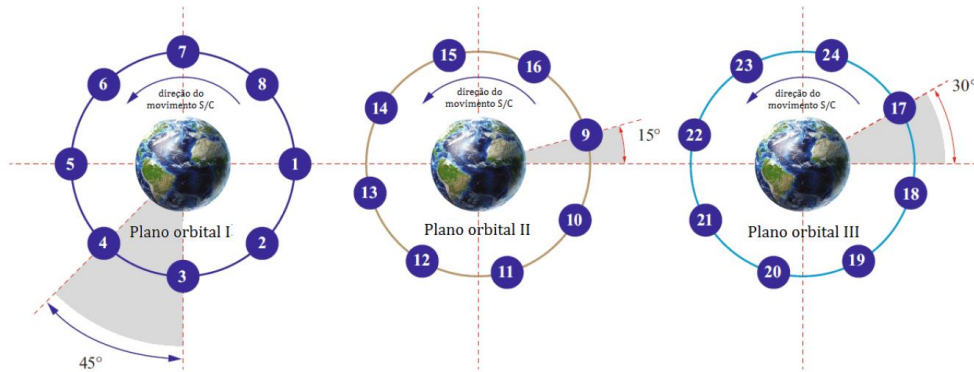
Figura 3.5 - Ilustração dos satélites da constelação GLONASS: Série I (a), Série M (b), Série K1 (c), e Série K2 (d).



Fonte: Adaptado de [Revnivykh et al. \(2017\)](#).

Assim como no sistema GPS, cada satélite GLONASS é identificado por um número de posição, o qual descreve sua localização ao longo de um determinado plano orbital. Na Figura 3.6 apresenta-se uma ilustração dos três planos orbitais da constelação GLONASS. As posições de 1 a 8 pertencem ao plano orbital 1, enquanto os planos orbitais 2 e 3 compreendem as posições de 9 a 16 e de 17 a 24, respectivamente.

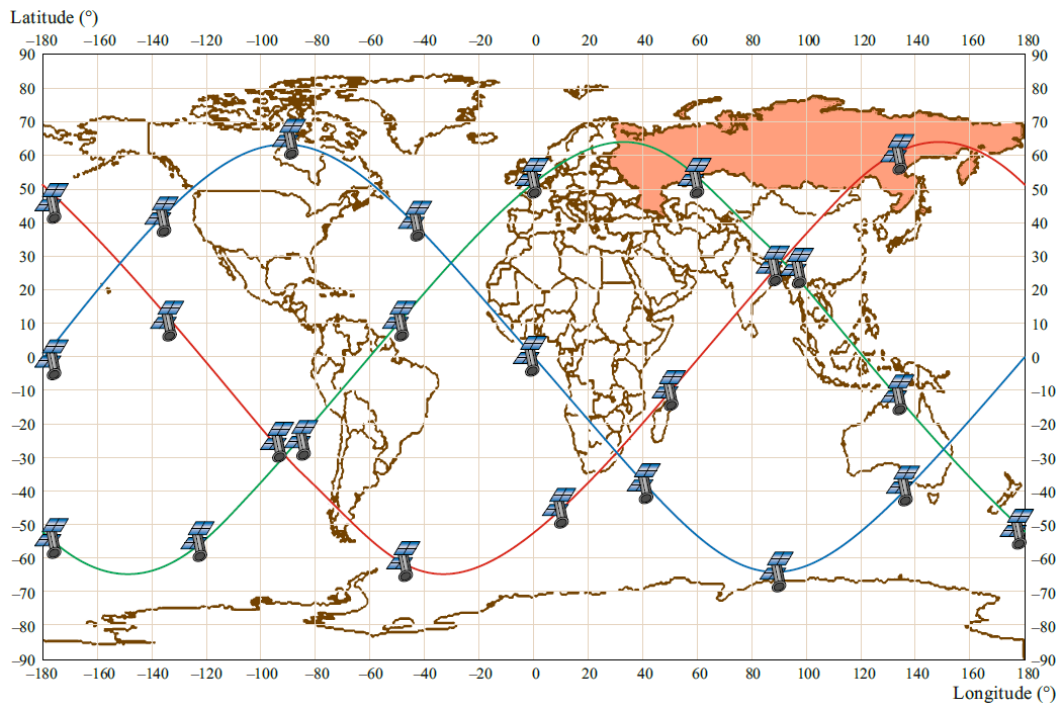
Figura 3.6 - Planos orbitais e posições dos satélites da constelação GLONASS.



Fonte: Adaptado de [Revnivykh et al. \(2017\)](#).

Devido à sua configuração orbital, o deslocamento dos satélites GLONASS não ocorre em sincronia com a rotação da Terra. Os planos orbitais são projetados de tal forma que cada satélite completa aproximadamente 17 órbitas durante um período de oito dias equinociais. Conseqüentemente, a cada oito dias um satélite passa sobre o mesmo ponto na superfície terrestre. Diante disso, os satélites da constelação GLONASS se deslocam em relação à superfície terrestre ao longo de trajetórias relativamente similares. Na Figura 3.7, apresenta-se um mapa ilustrando as trajetórias terrestres dos satélites GLONASS. Nesta, cada linha de cor diferente representa um dos três planos orbitais. Observa-se que tal configuração de órbitas permite uma maior cobertura de pontos localizados em altas latitudes em comparação à constelação de satélites GPS.

Figura 3.7 - Trajetórias terrestres dos satélites da constelação GLONASS. Cada linha de cor diferente representa um dos três planos orbitais.



Fonte: [Revnivykh et al. \(2017\)](#).

Características dos sinais GLONASS

O sistema GLONASS utiliza duas técnicas de multiplexação: o acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*) e o acesso múltiplo por divisão de código (CDMA, do inglês *Code Division Multiple Access*) ([SIMON et al., 1985](#)). Cada satélite da constelação GLONASS é capaz de transmitir um conjunto de diferentes sinais, os quais podem ser modulados utilizando FDMA e/ou CDMA, a depender da classe de satélites utilizada. Em uma visão geral, os sinais GLONASS são transmitidos nas seguintes bandas de frequência (portadoras) ([REVNIVYKH et al., 2017](#); [ROMERO, 2021](#)):

- $L1(k) = (1602,0 + 0,5625k)$ MHz, onde $-7 \leq k \leq 12$
- $L2(k) = (1246,0 + 0,4375k)$ MHz, onde $-7 \leq k \leq 12$
- L1a (1600,995 MHz)
- L2a (1248,060 MHz)
- L3 (1202,025 MHz)

Ao contrário do GPS, o sistema GLONASS transmite seus sinais em portadoras com frequência fixa (CDMA) e variável (FDMA) de acordo com o canal de transmissão, k . Portanto, apenas a portadora L3 é transmitida unicamente em uma frequência fixa de 1202.025 MHz, enquanto as portadoras L1 e L2 podem ser transmitidas em frequências fixas e variáveis. De forma específica, a portadora L1 pode ser transmitida na frequência de 1600,995 MHz (L1a) e no intervalo de ~1598.0 MHz a ~1608.7 MHz. A portadora L2 pode ser transmitida na frequência de 1248,060 MHz (L2a) e no intervalo de ~1242.9 MHz a ~1251.2 MHz. Ressalta-se que esses intervalos podem variar, considerando que novos canais têm sido adicionados com o passar dos anos (ROMERO, 2021). As bandas de transmissão L1 e L2 têm sido utilizadas desde a operacionalização do sistema GLONASS, enquanto a banda L3 foi introduzida nos satélites GLONASS-K1, lançados a partir de 2012.

Na Tabela 3.3 apresenta-se um resumo das características dos satélites GLONASS, organizadas de acordo com cada grupo de satélites. Estão incluídas informações sobre o ano de lançamento inicial de cada modelo, juntamente com as portadoras transmitidas em frequências fixas (CDMA) e variáveis (FDMA). Em seguida, a Tabela 3.4 apresenta uma visão geral dos principais sinais transmitidos nas bandas L1, L2 e L3 do sistema GLONASS, classificados de acordo com os canais de transmissão utilizados.

Tabela 3.3 - Descrição das bandas de frequência (portadoras) transmitidas pelos satélites GLONASS.

Parâmetro	Série I	Série M	Série M+	Série K1	Série K1+	Série K2
Primeiro lançamento	1982	2003	2014	2012	2017	2016
Expectativa de duração	3 anos	7 anos	7 anos	10 anos	10 anos	>10 anos
Bandas FDMA	L1, L2	L1, L2	L1, L2	L1, L2	L1, L2	L1, L2
Bandas CDMA	-	-	L3	L3	L2, L3	L1, L2, L3

Fonte: Adaptado de [Revnivykh et al. \(2017\)](#).

Tabela 3.4 - Resumo dos principais sinais modulados nas bandas L1, L2 e L3 do sistema GLONASS.

Banda/Portadora	Sinal	Canais
L1(<i>k</i>)	C1	C, P
	L1	C, P
	D1	C, P
	S1	C, P
L1a	C4	A, B, X
	L4	A, B, X
	D4	A, B, X
	S4	A, B, X
L2(<i>k</i>)	C2	C, P
	L2	C, P
	D2	C, P
	S2	C, P
L2a	C6	A, B, X
	L6	A, B, X
	D6	A, B, X
	S6	A, B, X
L3	C3	I, Q, X
	L3	I, Q, X
	D3	I, Q, X
	S3	I, Q, X

Fonte: Adaptado de [Romero \(2021\)](#).

Assim como no sistema GPS, os sinais GLONASS também são identificados utilizando os três caracteres do código TNA. Assim, os caracteres numéricos de cada identificador representam as portadoras utilizadas, da seguinte forma:

- L1(*k*) = 1 (ex. C1P)
- L1a = 4 (ex. C4X)
- L2(*k*) = 2 (ex. L2P)
- L2a = 6 (ex. C6X)
- L3 = 3 (ex. L3Q)

3.2.3 Galileo

O desenvolvimento do sistema Galileo foi iniciado no fim de 2003, sob a responsabilidade da Agência Espacial Europeia (ESA, do inglês *European Space Agency*). A princípio, foram lançados dois satélites de validação da órbita Galileo (GIOVE, do inglês *Galileo In-Orbit Validation Element*) em 2005 e 2008, respectivamente. Esses satélites foram utilizados para garantir o sistema de radiofrequências provisoriamente reservado para o Galileo pela União Internacional de Telecomunicações (ITU, do inglês *International Telecommunication Union*). A seguinte fase teve como objetivo realizar os testes iniciais do sistema Galileo utilizando uma constelação reduzida de quatro satélites de validação em órbita (IOV, do inglês *In-Orbit Validation*), o número mínimo para soluções independentes de posição e tempo em locais de teste. Esses lançamentos foram realizados em conjunto, com dois satélites por vez (2011 e 2012). O segmento espacial do sistema Galileo atingiu sua capacidade operacional total em meados de 2017, quando os trinta satélites iniciais foram colocados em órbita, juntamente com a conclusão da infraestrutura terrestre (FALCONE et al., 2017). Ressalta-se que após a conclusão desta etapa, os satélites passam a ser denominados como “satélites de capacidade operacional total” (FOC, do inglês *Full Operational Capability*).

Na Figura 3.8 apresenta-se uma imagem artística ilustrando um dos satélites FOC utilizados pelo sistema Galileo.

Figura 3.8 - Ilustração de um dos satélites FOC utilizados no sistema Galileo.

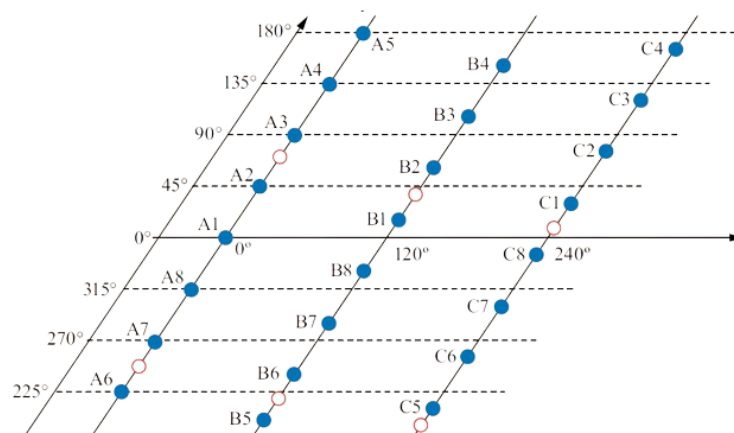


Fonte: [ESA \(2014\)](#).

O segmento espacial operacional do sistema Galileo consiste primariamente de um grupo de trinta satélites em órbita MEO, dos quais seis são sobressalentes. Esses satélites são posicionados em três planos orbitais (A, B e C), com altitude de ~23.222 km e inclinação de 56° em relação ao plano equatorial (FALCONE et al., 2017; ZHANG et al., 2019). A inclinação dos planos orbitais proporciona uma melhor cobertura nas regiões de latitudes elevadas em comparação com o GPS, por exemplo. Essa configuração permite visualizar de seis a onze satélites Galileo em qualquer local do globo terrestre, com uma visibilidade média de oito satélites para uma linha de visada com elevação acima de 5 graus.

Na Figura 3.9 apresenta-se uma ilustração da configuração orbital dos satélites Galileo. Assim como nos demais sistemas GNSS, os satélites são identificados de acordo com *slots* numéricos nos planos orbitais A, B e C. Os símbolos em azul representam a configuração inicial dos 24 satélites que formam a base da constelação Galileo. Os símbolos em vermelho ilustram as possíveis posições dos satélites sobressalentes.

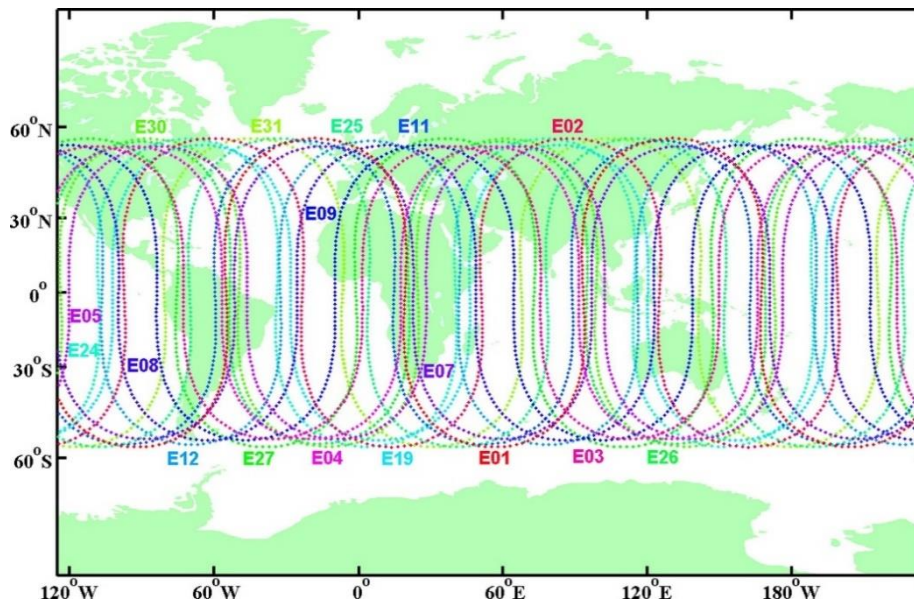
Figura 3.9 - Planos orbitais e *slots* da constelação de satélites Galileo.



Fonte: Falcone et al. (2017).

A Figura 3.10 ilustra as trajetórias terrestres de alguns dos satélites Galileo, obtidas entre 21/06/2018 e 30/06/2018. Cada linha de cor distinta representa um dos satélites selecionados para o rastreamento. Observa-se que a configuração orbital dos satélites do sistema Galileo proporciona uma cobertura completa da região entre as latitudes 60°S e 60°N.

Figura 3.10 - Trajetórias terrestres dos satélites Galileo no período entre 21/06/2018 e 30/06/2018.



Fonte: Zhang et al. (2019).

Características dos sinais Galileo

Cada satélite da constelação Galileo transmite um conjunto de sinais, os quais são modulados nas seguintes portadoras:

- L1 (1575,420 MHz)
- L5a (1176,450 MHz)
- L5b (1207,140 MHz)
- L5 (L5a+L5b, 1191,795 MHz)
- L6 (1278,750 MHz)

Assim como nos sistemas GPS e GLONASS, o Galileo proporciona diversos sinais, dentre eles a pseudodistância (C), fase da portadora (L), desvio de frequência devido ao efeito Doppler (D) e intensidade do sinal (S). Na Tabela 3.5 apresenta-se um resumo desses sinais, classificados de acordo com a banda de frequência e o canal de transmissão dentro do segmento espacial do sistema Galileo.

Tabela 3.5 - Resumo dos principais sinais modulados nas bandas L1, L5 e L6 do sistema Galileo.

Banda/Portadora	Sinal	Canais
L1	C1	A, B, C, X (B+C), Z (A+B+C)
	L1	A, B, C, X (B+C), Z (A+B+C)
	D1	A, B, C, X (B+C), Z (A+B+C)
	S1	A, B, C, X (B+C), Z (A+B+C)
L5a	C5	I, Q, X (I+Q)
	L5	I, Q, X (I+Q)
	D5	I, Q, X (I+Q)
	S5	I, Q, X (I+Q)
L5b	C7	I, Q, X (I+Q)
	L7	I, Q, X (I+Q)
	D7	I, Q, X (I+Q)
	S7	I, Q, X (I+Q)
L5	C8	I, Q, X (I+Q)
	L8	I, Q, X (I+Q)
	D8	I, Q, X (I+Q)
	S8	I, Q, X (I+Q)
L6	C6	A, B, C, X (B+C), Z (A+B+C)
	L6	A, B, C, X (B+C), Z (A+B+C)
	D6	A, B, C, X (B+C), Z (A+B+C)
	S6	A, B, C, X (B+C), Z (A+B+C)

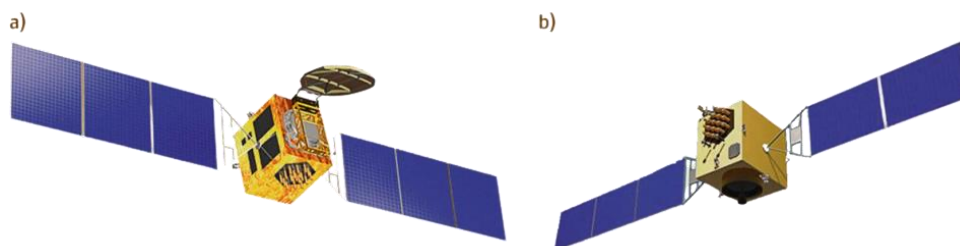
Fonte: Adaptado de [Romero \(2021\)](#).

3.2.4 BeiDou

O BeiDou começou a ser planejado pelo governo chinês em meados da década de 1980. Este sistema GNSS foi implantando em três etapas (YANG et al., 2017). Na primeira etapa, em 2000, foi estabelecido um serviço regional de determinação por rádio satélite (RDSS, do inglês *Radio Determination Satellite Service*), denominado BDS-1. Nessa fase, o BDS-1 contava apenas com as capacidades básicas do BeiDou. Posteriormente, em 2012, foi implementada a segunda etapa do BeiDou, consistindo em um serviço regional de navegação por rádio satélite (RNSS, do inglês “*Radio Navigation Satellite Service*”). A etapa final, implementada entre 2012 e 2020, correspondeu à operacionalização em capacidade total do RNSS, com a inserção em órbita de 35 satélites da constelação BeiDou (RAN, 2012).

Ao contrário da maioria dos sistemas GNSS, a constelação BeiDou não se limita apenas a órbitas MEO. O segmento espacial do BeiDou é composto por satélites separados em grupos de acordo com as seguintes órbitas: MEO, GEO e órbita geossíncrona inclinada (IGSO, do inglês *Inclined Geosynchronous Orbit*). Na Figura 3.11, apresentam-se ilustrações dos satélites (a) GEO e (b) MEO/IGSO da constelação BeiDou.

Figura 3.11 - Satélites (a) GEO e (b) MEO/IGSO do sistema BeiDou.



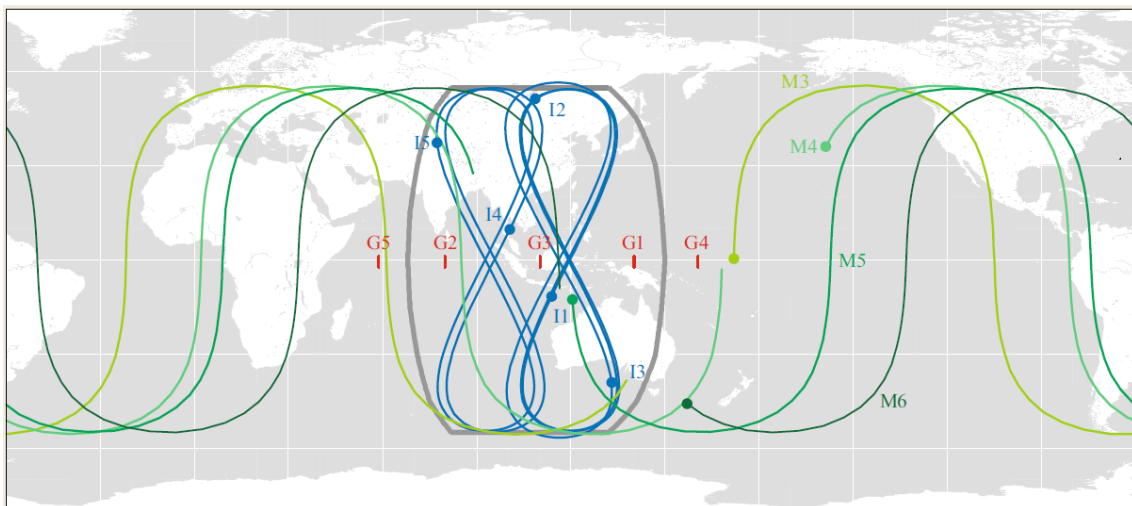
Fonte: Yang et al. (2017).

Os satélites da constelação BeiDou utiliza uma configuração orbital única, combinando elementos dos sistemas globais (ex. GPS) com regionais (ex. QZSS). Os satélites BeiDou-GEO são posicionados de tal forma que pelo menos três deles estejam sempre visíveis acima de 10° de elevação a partir de qualquer ponto da área de cobertura. Adicionalmente, os satélites IGSO operam em órbitas circulares com altitude aproximada de cerca de

36.000 km e inclinação de 55° com relação ao plano equatorial. Assim como os satélites GEO, os satélites IGSO têm período orbital de 1 dia sideral (~24 horas).

Na Figura 3.12, apresenta-se um mapa das trajetórias terrestres dos satélites GEO ('G', em vermelho), IGSO ('I', em azul) e MEO ('M', em verde) da constelação BeiDou. Nota-se que os satélites GEO assumem trajetórias fixas em relação à rotação da Terra, uma vez que para estes o referencial orbital é estático. Os satélites IGSO seguem trajetórias que se concentram em torno da região destacada da cor cinza, de modo a proporcionar uma melhor cobertura da região do continente Asiático. Por fim, os satélites MEO são os que percorrem trajetórias globais, cobrindo áreas continentais fora do âmbito regional do BeiDou (ex. continente Americano).

Figura 3.12 - Mapa das trajetórias terrestres dos satélites GEO ('G', em vermelho), IGSO ('I', em azul) e MEO ('M', em verde) da constelação BeiDou.



Fonte: Yang et al. (2017).

Características dos sinais BeiDou

Assim como nos demais sistemas GNSS, os satélites da constelação BeiDou transmitem um conjunto de sinais, incluindo C, L, D e S. Esses sinais são modulados nas seguintes bandas de frequência (ROMERO, 2021):

- L1 (1561,098 MHz)
- L1A (1575,42MHz)
- L1C (1575,42MHz)

- L2 (1207,14 MHz)
- L2a (1176,45 MHz)
- L2b (1207,14 MHz)
- L2c (L2a+ L2b) (1191,795 MHz)
- L3 (1268,52 MHz)
- L3A (1268,52 MHz)

O conjunto de sinais do sistema BeiDou é modulado nas portadoras L1, L2 e L3. No entanto, tanto L1 quanto L2 são subdivididas em sub-bandas, conhecidas como L1A, L1C, L2a, L2b, L2c e L3A. Essas sub-bandas funcionam como portadoras independentes, nas quais os sinais C, L, D e S são modulados, assim como nas portadoras primárias (L1, L2 e L3).

Na Tabela 3.6 apresenta-se um resumo dos sinais transmitidos pelo sistema BeiDou. Esses sinais são classificados de acordo com a banda de frequência e o canal de transmissão dentro do segmento espacial do sistema BeiDou.

Tabela 3.6 - Resumo dos principais sinais modulados nas bandas L1, L2 e L3 do sistema BeiDou.

Banda	Sinal	Canais	Banda	Sinal	Canais
L1	C2	I, Q, X (I+Q)	L2b	C7	D, P, Z (D+P)
	L2	I, Q, X (I+Q)		L7	D, P, Z (D+P)
	D2	I, Q, X (I+Q)		D7	D, P, Z (D+P)
	S2	I, Q, X (I+Q)		S7	D, P, Z (D+P)
L1A	C1	S, L, Z (S+L)	L2c	C8	D, P, X (D+P)
	L1	S, L, Z (S+L)		L8	D, P, X (D+P)
	D1	S, L, Z (S+L)		D8	D, P, X (D+P)
	S1	S, L, Z (S+L)		S8	D, P, X (D+P)
L1C	C1	D, P, X (D+P)	L3	C6	I, Q, X (I+Q)
	L1	D, P, X (D+P)		L6	I, Q, X (I+Q)
	D1	D, P, X (D+P)		D6	I, Q, X (I+Q)
	S1	D, P, X (D+P)		S6	I, Q, X (I+Q)
L2	C7	I, Q, X (I+Q)	L3A	C6	D, P, Z (D+P)
	L7	I, Q, X (I+Q)		L6	D, P, Z (D+P)
	D7	I, Q, X (I+Q)		D6	D, P, Z (D+P)
	S7	I, Q, X (I+Q)		S6	D, P, Z (D+P)
L2a	C5	D, P, X (D+P)			
	L5	D, P, X (D+P)			
	D5	D, P, X (D+P)			
	S5	D, P, X (D+P)			

Fonte: Adaptado de [Romero \(2021\)](#).

3.3 Segmento de usuários e padrão de observáveis GNSS (RINEX)

O segmento de usuários dos sistemas GNSS é composto por receptores (estações) capazes de receber e processar os sinais de satélites na forma de observáveis (e.g. C, L) ([HOFFMANN-WELLENHOF et al., 2001](#)). Nesse contexto, os arquivos RINEX (do inglês *Receiver Independent Exchange Format*) contém as informações das observáveis obtidas

pelas estações GNSS. Cada estação possui arquivos RINEX diários onde os dados são armazenados de acordo com sua capacidade operacional, podendo operar uma ou mais constelações GNSS (ROMERO, 2021). Esses arquivos podem ser acessados livremente nos bancos de dados de diversas redes GNSS, tais como a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC¹).

O formato RINEX consiste basicamente em três arquivos:

- Arquivo com dados de observação
- Arquivo com mensagens de navegação
- Arquivo com dados meteorológicos

Para o cálculo do TEC, essencial neste trabalho, utiliza-se principalmente o arquivo RINEX com dados de observação. Nesse tipo de arquivo, além das observáveis GNSS, são disponibilizadas outras informações importantes, tais como as coordenadas geocêntricas do receptor, os satélites disponíveis e a época de cada observação. Maiores detalhes sobre o formato atual dos arquivos RINEX podem ser encontrados em Romero (2021).

3.4 Segmento de controle e padrão de órbitas GNSS (SP3)

O segmento de controle dos sistemas GNSS consiste em estações terrestres de controle e monitoramento, além de uma infraestrutura global com antenas de rastreamento. A principal função do segmento de controle é monitorar e controlar os satélites, além de determinar e prever suas órbitas, dentre outras tarefas (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001; MONICO, 2008). Nesse sentido, assim como as observáveis GNSS, as órbitas dos satélites também são disponibilizadas em formatos de arquivos padrão.

As órbitas dos satélites GNSS têm sido disponibilizadas pelos centros de análise no formato SP3 (do inglês *Standard Precise Ephemeris Format*). Os arquivos ‘.SP3’ fornecem as posições orbitais dos satélites em coordenadas geocêntricas em intervalos de tempo específicos, com alta precisão. Geralmente, os arquivos de órbitas dos satélites

¹ https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/

GNSS são disponibilizados de forma individual, onde cada arquivo contém as órbitas dos satélites de cada constelação. Contudo, uma iniciativa do serviço internacional de GNSS (IGS, do inglês *International GNSS Service*), denominada Experimento Multi-GNSS (MGEX, do inglês *Multi-GNSS Experiment*), surgiu em 2012 com o intuito de disponibilizar arquivos contendo dados de múltiplas constelações GNSS, dentre eles as órbitas precisas dos satélites. Não foram realizadas alterações significativas no formato dos arquivos de órbita. No entanto, o IGS² começou a disponibilizar dados multiconstelação, o que facilita o acesso a essas informações. Portanto, os arquivos ‘.SP3’ disponibilizados pelo IGS/MGEX inclui as órbitas dos satélites de diversos sistemas GNSS, tais como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou (IGS, 2017).

² https://igs.org/mgex/data-products/#orbit_clock

4 METODOLOGIA: CÁLCULO DO TEC UTILIZANDO DADOS DE SISTEMAS GNSS

Este capítulo descreve a metodologia de cálculo dos dados de TEC empregados na obtenção dos índices ionosféricos utilizados neste trabalho. Essa metodologia consiste no uso de dados GNSS multi-frequência e multiconstelação. De forma específica, o TEC é calculado utilizando-se dados do GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, por meio da comparação entre pares de frequências específicos. Na Seção 4.1 deste capítulo, apresenta-se uma visão teórica sobre a produção de elétrons livres na ionosfera, com foco na compreensão dos conceitos necessários à definição do modelo físico utilizado no cálculo do TEC. A Seção 4.2 apresenta o conceito de modelo ionosférico de camada unitária, juntamente com uma descrição detalhada das equações relacionadas a esse modelo, tendo como base os parâmetros GNSS. Na Seção 4.3 apresenta-se uma descrição da etapa de pré-processamento das observáveis GNSS utilizadas no cálculo do TEC, com foco na detecção de erros de observação (*cycle slips* e *outliers*). Adicionalmente, a Seção 4.4 apresenta a etapa metodológica de nivelamento e modelagem das medidas de fase. Finalmente, a Seção 4.5 apresenta as equações de cálculo do VTEC e STEC utilizando as observáveis GNSS pré-processadas e corrigidas.

4.1 Equação da produção de elétrons livres na ionosfera

O TEC é um parâmetro físico que fornece uma medida aproximada da quantidade total de elétrons livres na atmosfera da Terra. Essa medida resulta da integração vertical da densidade de plasma ao longo de uma trajetória, desde a superfície até o limite vertical máximo (KERSLEY, 2004). Nesse contexto, a distribuição vertical da densidade eletrônica pode ser obtida tendo como base a teoria de Chapman, que descreve a ionização da atmosfera por meio da produção de pares íon-elétron (CHAPMAN, 1931; GARRIOT e SMITH, 1965). Logo, considerando uma camada atmosférica isotérmica com estratificação plana, composta por um único constituinte gasoso ideal, que é ionizada por um feixe monocromático de radiação solar em um ângulo de incidência, χ , o perfil vertical da densidade de elétrons livres, n_e pode ser aproximado pela função de produção de Chapman, dada pela Equação 4.1:

$$n_e = N_0 \exp\left(\frac{1}{2}[1 - z - \sec\chi \exp(-z)]\right), \quad (4.1)$$

onde $z = \frac{h-h_0}{H}$.

Na Equação 4.1, N_0 representa a densidade máxima de elétrons da camada atmosférica, h corresponde à altura acima da superfície terrestre, h_0 representa o pico vertical de densidade eletrônica e H é a altura de escala de pressão do gás atmosférico. O termo χ corresponde ao ângulo entre o vetor perpendicular à superfície terrestre (zênite) e o vetor diretor dos raios solares projetados em um determinado ponto, denominado ângulo solar zenital.

Quando a radiação solar atinge a atmosfera terrestre, os fótons carregados de energia podem interagir com os átomos e moléculas presentes na atmosfera, removendo elétrons dos seus níveis de energia mais externos. Essa interação resulta na formação de íons positivos e elétrons livres. Os elétrons livres, por sua vez, podem interagir com outros átomos e moléculas presentes na atmosfera, transferindo energia e provocando a ionização dessas espécies. Esse processo de ionização por colisão ocorre quando os elétrons livres colidem com átomos neutros, removendo elétrons dos níveis de energia desses átomos e gerando novos íons positivos (KELLEY, 2009).

Uma vez que a teoria de Chapman sugere que a produção de íons e elétrons na atmosfera ocorre de maneira proporcional, é possível obter uma medida representativa da quantidade total de elétrons livres por meio do cálculo do TEC. Do ponto de vista dos sistemas GNSS, o TEC pode ser definido como o número de elétrons livres ao longo da trajetória entre o receptor terrestre e um satélite em órbita. Nesse contexto, o TEC é representado em unidades de TEC (TECU, do inglês *Total Electron Content Unit*), onde $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elétrons/m}^2$.

Diante desses conceitos, o conteúdo eletrônico total verticalizado (VTEC, do inglês *Vertical Total Electron Content*), obtido para uma determinada altura, h , pode ser simplificado por meio da Equação 4.2 (HOBIGER e JAKOWSKI, 2017):

$$VTEC = \int n_e dh, \quad (4.2)$$

enquanto o conteúdo eletrônico total inclinado (STEC, do inglês *Slant Total Electron Content*), obtido ao longo de uma trajetória com inclinação equivalente a χ pode ser simplificado por meio da Equação 4.3 (HOBIGER e JAKOWSKI, 2017):

$$STEC = \int n_e ds, \quad (4.3)$$

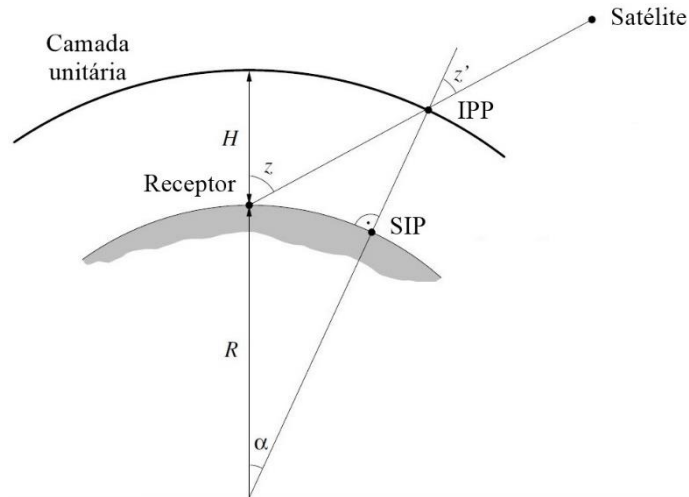
O perfil vertical de densidade eletrônica descrito pela Equação 4.1 foi utilizado por Chapman para estabelecer um modelo simplificado da estrutura vertical da ionosfera, conhecido como modelo de camada ionosférica unitária (modelo de Chapman) (CHAPMAN, 1931). Esse modelo pressupõe uma densidade uniforme do plasma ionosférico em uma altitude específica (pico de ionização), permitindo simplificar o cálculo do TEC através das Equações 4.2 e 4.3, utilizando parâmetros obtidos a partir de observáveis GNSS. Mais detalhes sobre esse modelo são apresentados na Seção 4.2, a seguir.

4.2 Modelo ionosférico de camada unitária

O modelo ionosférico de camada unitária (SLM, do inglês *Single-Layer Model*), também conhecido como modelo de Chapman, é uma representação simplificada da estrutura vertical da ionosfera (KELLEY, 2009). Este modelo descreve como a densidade do plasma ionosférico varia com a altitude. De acordo com o modelo SLM, a densidade eletrônica na ionosfera é considerada uniforme em uma determinada altitude, conhecida como altitude de pico da camada. Em resumo, este modelo pressupõe que todos os elétrons livres da ionosfera estão concentrados em uma camada de espessura infinitesimal em uma altitude fixa (SCHAER, 1999; MENDOZA et al., 2019b). Abaixo dessa altitude, a densidade eletrônica diminui rapidamente, enquanto acima dela, a densidade diminui gradualmente até atingir valores muito baixos. Conforme demonstrado pela Equação 4.1, o modelo de Chapman assume que a distribuição vertical da densidade eletrônica na ionosfera pode ser aproximada por uma função exponencial decrescente (CHAPMAN, 1931). Essa função é conhecida como perfil de densidade de Chapman.

Na Figura 4.1, apresenta-se uma ilustração bidimensional do modelo SLM. Nesta ilustração, é destacado o ponto de penetração ionosférica (IPP, do inglês *Ionospheric Pierce Point*), que corresponde ao ponto da trajetória satélite-receptor que incide na camada unitária. Além disso, também é destacado o ponto de penetração sub-ionosférica (SIP, do inglês *Sub-ionospheric Pierce Point*), que corresponde à projeção do IPP na superfície terrestre na direção zenital. Por fim, H representa a altura da camada unitária acima da superfície terrestre, R é o raio médio da Terra, $\alpha = z - z'$ corresponde ao ângulo entre a direção zenital no receptor e no IPP e os termos z e z' representam os ângulos zenitais da trajetória satélite-receptor nas altitudes do receptor GNSS e da camada unitária, respectivamente.

Figura 4.1 - Ilustração do modelo ionosférico de camada unitária.



Fonte: Adaptado de [Dach et al. \(2015\)](#).

A função de mapeio do SLM, denominada F , pode ser obtida por meio da Equação 4.4, a seguir:

$$F(z) = \frac{TEC}{VTEC} = \frac{1}{\cos z'} \quad , \quad (4.4)$$

onde:

$$\text{sen } z' = \frac{R}{R + H} \text{sen } z \quad , \quad (4.5)$$

A altura da camada ionosférica descrita pelo SLM é geralmente definida com base na altura esperada do pico de ionização, que pode variar entre 350 km e 450 km (SCHAER, 1999; TAKAHASHI et al., 2016).

Schaer (1999) introduziu um coeficiente adicional, correspondente ao ângulo α , no modelo de camada unitária original (SLM), resultando no chamado modelo de camada unitária modificado (MSLM, do inglês *Modified Single-Layer Model*). A função de mapeio do MSLM pode ser obtida utilizando a Equação 4.6, a seguir:

$$MF(z) = \frac{TEC}{VTEC} = \frac{1}{\cos z'} \quad , \quad (4.6)$$

onde:

$$\text{sen } z' = \frac{R}{R + H} \text{sen}(\alpha z) \quad , \quad (4.7)$$

De acordo com Dach et al. (2015), o melhor ajuste das Equações (4.6) e (4.7) é obtido ao assumir $H = 506,7 \text{ km}$ e $\alpha = 0,9782$. Além disso, utiliza-se $R = 6371 \text{ km}$ e considera-se um ângulo zenital máximo de 80 graus, o que corresponde a um ângulo mínimo de elevação da trajetória satélite-receptor de 10 graus. Para o cálculo do IPP em estações GNSS terrestres, assume-se neste trabalho uma altura aproximada de $H = 450 \text{ km}$, conforme a metodologia apresentada por Schaer (1999).

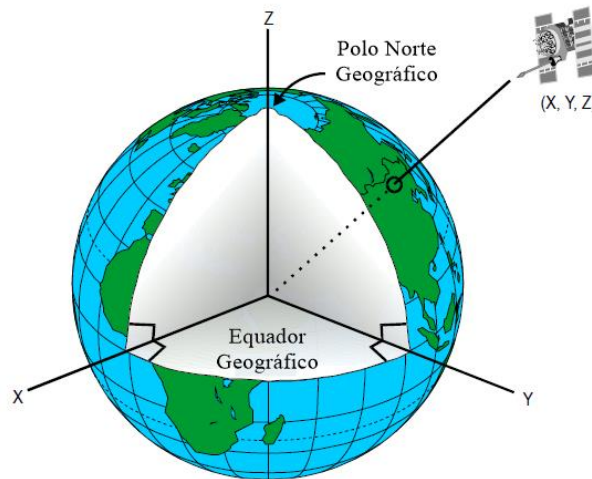
4.2.1 Cálculo das coordenadas do IPP utilizando dados GNSS

Levando em consideração a geometria de um sinal obtido por um receptor GNSS terrestre, é possível calcular as coordenadas do IPP utilizando informações orbitais dos satélites e tomando como referência a localização do receptor terrestre. Nesse contexto, é possível obter a latitude, longitude, elevação e azimute do IPP por meio do cálculo do vetor distância entre o receptor GNSS e o satélite em órbita. Isso permite a obtenção desses parâmetros de maneira precisa para o posterior georreferenciamento das medidas de TEC.

A posição de um determinado satélite GNSS, obtida dos arquivos de órbita, é definida inicialmente em um sistema de referência fixo à Terra (ECEF, do inglês *Earth-centered*,

Earth-fixed) (DACH et al., 2015). Este referencial é amplamente utilizado para representar a localização de pontos no espaço tridimensional tendo o centro da Terra como origem. Na Figura 4.2, apresenta-se uma ilustração do sistema de coordenadas ECEF, no qual é possível representar a posição de um determinado satélite conhecendo os valores das componentes X, Y e Z do seu vetor de posição.

Figura 4.2 – Posição de um satélite no sistema de referência ECEF.



Fonte: Adaptado de Han et al. (2013).

O primeiro passo para calcular as coordenadas do IPP consiste em obter o vetor de posição do satélite do arquivo de órbitas. Esse vetor representado no ECEF, ou $\overrightarrow{R_{ECEF}^S}$, poder ser expresso por:

$$\overrightarrow{R_{ECEF}^S} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

onde X_s , Y_s e Z_s representam as coordenadas do vetor posição nos respectivos eixos do sistema de referência ECEF escolhido.

Para calcular os ângulos de azimute e elevação do satélite GNSS em um ponto específico da superfície terrestre (receptor), é necessário converter o vetor R_{ECEF}^S para um sistema local, que neste caso será o NED (do inglês *North-East-Down*). Essa conversão permite expressar a posição do satélite em um sistema de coordenadas fixo na superfície da Terra.

A conversão de coordenadas ECEF para NED é feita por meio da seguinte matriz de cossenos diretores (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001; NOONAN, 2007):

$$D_{NED}^{ECEF} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi + 90^\circ) & 0 & \sin(\varphi + 90^\circ) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi + 90^\circ) & 0 & \cos(\varphi + 90^\circ) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos(\lambda) & \sin(\lambda) & 0 \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (4.9)$$

onde φ representa a latitude e λ a longitude do sistema de origem.

Logo, a posição do satélite GNSS no sistema local NED, $\overrightarrow{R_{NED}^s}$, poderá ser obtida por meio da seguinte transformação:

$$\overrightarrow{R_{NED}^s} = D_{NED}^{ECEF} (\overrightarrow{R_{ECEF}^s} - \overrightarrow{R_{ECEF}^r}), \quad (4.10)$$

onde $\overrightarrow{R_{ECEF}^r}$ é o vetor posição do receptor terrestre representado no sistema ECEF.

Considerando:

$$\overrightarrow{R_{NED}^s} = [x, y, z]^T, \quad (4.11)$$

o azimute do satélite GNSS pode ser obtido da seguinte forma:

$$Az = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4.12)$$

Já a elevação do satélite GNSS pode ser obtida por meio de:

$$El = \text{atan}\left(\frac{-z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (4.13)$$

Partindo da Equação 4.7, obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{\text{sen } z'}{R} = \frac{\text{sen}(El + 90^\circ)}{R + H} \quad (4.14)$$

Portanto:

$$z' = \text{sen}^{-1} \left(\frac{R \cos(El)}{R + H} \right) \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 180^\circ - (El + 90^\circ) - z' \\ \alpha &= 90^\circ - El - z' \end{aligned} \quad (4.16)$$

Assim, a distância, s , entre o receptor e camada ionosférica unitária é dada por:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{s} = \frac{\text{sen}(z')}{R} \quad (4.17)$$

$$s = (R + H) \frac{\text{sen}(\alpha)}{\cos(El)} \quad (4.18)$$

Então, é possível obter a posição do ponto IPP no sistema NED do receptor GNSS por meio de:

$$\overrightarrow{R_{NED}^{IPP}} = s \left(\frac{\overrightarrow{R_{NED}^s}}{\left| \overrightarrow{R_{NED}^s} \right|} \right) \quad (4.19)$$

Assim, utiliza-se o processo inverso para converter a posição do IPP do sistema NED para o ECEF:

$$\overrightarrow{R_{ECEF}^{IPP}} = (D_{NED}^{ECEF})^T \overrightarrow{R_{NED}^{IPP}} + \overrightarrow{R_{ECEF}^T} \quad , \quad (4.20)$$

Uma vez obtidas as coordenadas do IPP no sistema ECEF, é possível obter as suas coordenadas geodésicas considerando o sistema de referência geodésico global WGS84. O WGS84 é um sistema que define um elipsoide de referência para Terra, fornecendo um referencial de localização comum com relação a essa superfície. Essa conversão pode ser realizada utilizando as relações matemáticas apresentadas a seguir, que estabelecem a correspondência entre os sistemas de coordenadas.

A posição do IPP em coordenadas ECEF poder ser representada por meio de:

$$\overrightarrow{R_{ECEF}^{IPP}} = \begin{bmatrix} X_{IPP} \\ Y_{IPP} \\ Z_{IPP} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Para o sistema WGS84, utilizam-se os seguintes coeficientes (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001):

$$a = 6,378137 \times 10^6 \text{ m} \quad (4.22)$$

$$b = 6,356752314 \times 10^6 \text{ m} \quad (4.23)$$

$$e^2 = 6,69438 \times 10^{-3} \quad (4.24)$$

$$e'^2 = 6,7395 \times 10^{-3} \quad (4.25)$$

Diante desses coeficientes, a representa o semieixo maior e b representa o semieixo menor do elipsoide de referência no sistema WGS84. O termo e^2 representa o quadrado da primeira excentricidade e e'^2 representa o quadrado da segunda excentricidade do elipsoide. Nesse contexto, a excentricidade numérica do elipsoide indica a magnitude da deformação do elipsoide em relação a uma forma esférica ideal. Em geral, quanto maior a excentricidade, maior é o grau de achatamento (do inglês *flatness*) do elipsoide.

Assim, utilizam-se as seguintes relações matemáticas:

$$P = \sqrt{X_{IPP}^2 + Y_{IPP}^2} \quad (4.26)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{Z_{IPP}a}{Pb}\right) \quad (4.27)$$

Com isso, a longitude em coordenadas geodésicas do IPP, λ_{IPP} , pode ser obtida por meio de:

$$\lambda_{IPP} = \text{atan}\left(\frac{Y_r}{X_r}\right) \quad , \quad (4.28)$$

e a latitude em coordenadas geodésicas do IPP, φ_{IPP} , é calculada por meio de:

$$\varphi_{IPP} = \text{atan} \left(\frac{Z_r + e'^2 b \text{sen}(\theta)^3}{P - e^2 a \text{cos}(\theta)^3} \right). \quad (4.29)$$

Logo, tem-se:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \text{sen}(\varphi_r)^2}}. \quad (4.30)$$

Por fim, calcula-se a altitude do IPP em coordenadas geodésicas, h_r :

Se $|\varphi_r| \geq 89^\circ$, então:

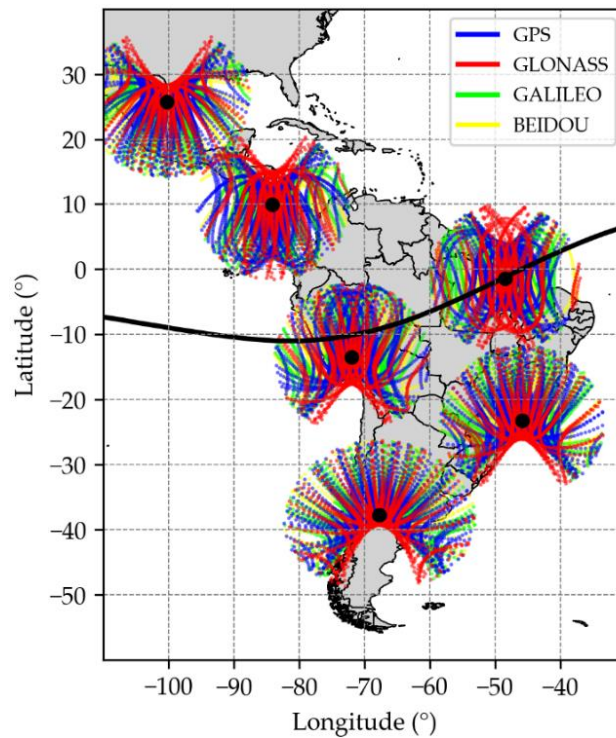
$$h_r = \frac{Z_r}{\text{sen}(\varphi_r)} - N(1 - e^2), \quad (4.31)$$

Se $|\varphi_r| \leq 89^\circ$, então:

$$h_r = \frac{P}{\text{cos}(\varphi_r)} - N, \quad (4.32)$$

Uma vez calculadas as coordenadas do IPP, é possível georreferenciar as medidas de TEC calculadas posteriormente, bem com os índices ionosféricos derivados diretamente deste parâmetro. Na Figura 4.3, apresenta-se um mapa que ilustra a evolução temporal das posições geográficas do IPP calculado para os satélites das constelações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou disponíveis sobre seis estações GNSS localizadas na América Latina, ao longo de um período de 24 horas. Os pontos na cor preta representam as localizações geográficas dos receptores terrestres. Ressalta-se que após o cálculo das efemérides dos IPPs, foram descartados os dados obtidos em trajetórias com ângulos de elevação menores que 10 graus.

Figura 4.3 - Evolução temporal das posições geográficas do IPP para satélites GNSS na América Latina ao longo de um período de 24 horas.



Fonte: Produção do autor.

4.3 Pré-processamento das observáveis GNSS utilizando combinações lineares

Assim como nos métodos de posicionamento por sistemas GNSS, o cálculo do TEC também pode ser afetado por diversos erros que afetam as observáveis e, conseqüentemente, a estimativa de atraso ionosférico (DEMYANOV et al., 2020). Efeitos decorrentes de inconsistências nos relógios, multicaminho e irregularidades no plasma ionosférico podem se propagar para o cálculo do TEC, resultando em alterações significativas na precisão e acurácia das medições.

Monico (2008) apresenta uma descrição dos principais erros associados às observáveis GNSS. Dentre eles, destacam-se principalmente os erros de propagação e sincronização, que são identificados nas observáveis L e C sob a forma de saltos de ciclo (do inglês *cycle slips*) e valores atípicos (do inglês *outliers*) (BLEWITT, 1990). Os *cycle slips* são definidos como interrupções ou descontinuidades nas medidas de fase (L) do sinal recebido pelo receptor GNSS (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994; MONICO, 2008; BANVILLE; LANGLEY, 2014). Os *outliers*, por sua vez, são observações discrepantes

ou inconsistentes em relação ao restante do conjunto de dados GNSS, podendo ser causados por erros aleatórios ou sistemáticos.

Com o intuito de atenuar erros de observação, este trabalho empregou uma metodologia de pré-processamento dos dados GNSS necessários para o cálculo do TEC. Essa metodologia compreende três etapas, visando detectar e considerar os *cycle slips* e *outliers* identificados nas observáveis GNSS utilizadas. Nas seções seguintes, apresenta-se cada uma das etapas desta metodologia.

4.3.1 Primeira etapa: pré-seleção de observáveis GNSS

A primeira etapa consiste em realizar uma pré-seleção de medidas de fase (L) e pseudodistância (C) em pares de bandas de frequência, para cada um dos satélites GNSS identificados no arquivo RINEX. Nesta etapa, são selecionados todos os pares de frequência possíveis para os satélites GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou de forma individual, seguindo o procedimento apresentado em [Mendoza et al. \(2019\)](#).

Na Tabela 4.1, apresenta-se uma lista dos pares de frequência selecionados para cada um dos sistemas GNSS utilizados: GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. Ressalta-se que a nomenclatura das frequências utilizadas é determinada de acordo com a medida de fase correspondente, conforme apresentado no Capítulo 3 (e.g. Galileo-L8 corresponde à frequência da banda L5 deste sistema). Em outras palavras, utiliza-se a banda de frequência correspondente a uma determinada medida de fase, conforme o sistema GNSS relacionado. Ressalta-se que tal nomenclatura é utilizada com o intuito de facilitar a identificação das observáveis GNSS nos arquivos RINEX, por meio do código TNA.

Tabela 4.1 – Pares de frequência selecionados para os sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou.

Sistema	Frequências	
GPS	L2	L5
	L1	L2
	L1	L5
GLONASS	L2	L3
	L1	L2
	L1	L3
Galileo	L7	L5
	L7	L6
	L6	L8
	L6	L5
	L1	L6
	L1	L7
	L1	L8
	L1	L5
BeiDou	L6	L7
	L2	L6
	L2	L7

Fonte: Adaptado de [Mendoza et al. \(2019b\)](#).

Após a pré-seleção das observáveis L e C, levando em consideração os pares de frequências apresentados na Tabela 4.1, são determinadas as ordens de prioridade para a utilização das observáveis de acordo com o canal GNSS associado, visando obter medidas com maior precisão. Para isso, utiliza-se o critério definido por [Nischan \(2016\)](#), que define a base para a seleção prioritária da observável GNSS de um determinado canal. Na Tabela 4.2, apresenta-se a ordem de prioridades de canais para a seleção das observáveis L e C, de acordo com o sistema GNSS utilizado, conforme as informações contidas no arquivo RINEX. O código inicia com o caractere correspondente ao canal com prioridade mais alta, seguido pelos canais com menor prioridade em relação a este. Maiores detalhes

sobre a configuração de canais de cada sistema GNSS podem ser encontrados no Capítulo 3 deste trabalho.

Tabela 4.2 – Ordem de prioridade de seleção das observáveis L e C para o cálculo do TEC, de acordo com os canais de transmissão dos sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. O primeiro caractere do código da ordem de prioridades representa o canal prioritário, seguido pelos canais com menor prioridade em relação a este.

Constelação	Frequência	Ordem de prioridades
GPS	L1	PWCSLXYMN
	L2	PWCSLXYMN
	L5	IQX
GLONASS	L1	PC
	L2	PC
	L3	IQX
Galileo	L1	BCX
	L5	IQX
	L6	BCX
	L7	IQX
	L8	IQX
BeiDou	L2	IQX
	L6	IQX
	L7	IQX

Fonte: Adaptado de [Nischan \(2016\)](#).

4.3.2 Segunda etapa: delimitação de intervalos com observações contínuas

Na segunda etapa de pré-processamento das observáveis GNSS, é realizado o processo de detecção de *cycle slips* nos dados de observáveis que posteriormente serão utilizados no cálculo do TEC. Esta etapa da metodologia é realizada por meio do cálculo da combinação linear Melbourne–Wübbena (MW), ϕ_6 , sobre as observáveis L e C selecionadas, considerando os pares de frequências apresentados na Tabela 4.1. Dessa forma, a combinação MW elimina os efeitos da ionosfera, da geometria, dos relógios e a contribuição troposférica das observáveis GNSS, sendo amplamente utilizada para a

detecção de variações abruptas nas medidas de fase (WÜBBENA, 1985; MELBOURNE, 1985; DACH et al., 2015; MENDOZA et al., 2019b).

De forma específica, a combinação MW proporciona uma estimativa de ruído das fases das portadoras, a qual será posteriormente utilizada na detecção de *cycle slips* e *outliers*. A combinação linear Melbourne–Wübbena pode ser obtida por meio da Equação (4.33):

$$\phi_6 = \frac{1}{f_a - f_b} (f_a L_a - f_b L_b) - \frac{1}{f_a + f_b} (f_a C_a + f_b C_b) \quad (4.33)$$

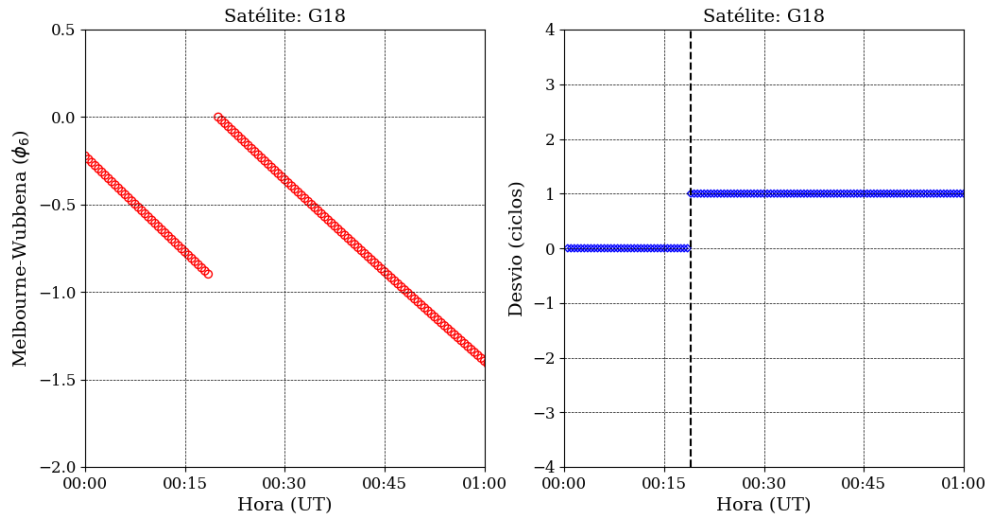
Na Equação (4.33), os termos f_a e f_b correspondem, respectivamente, às frequências das portadoras ‘a’ e ‘b’ de um determinado par de frequências. Os termos L_a e L_b representam as medidas de fase das portadoras ‘a’ e ‘b’ e os termos C_a e C_b representam as medidas de pseudodistância.

Após o cálculo da combinação MW para cada um dos pares de frequências apresentados na Tabela 4.1, obtém-se o valor de ϕ_6 , que representa o nível de ruído (em ciclos) das observáveis L e C. Dessa forma, variações abruptas na amplitude de ϕ_6 podem indicar a presença de *cycle slips* e/ou *outliers*.

Na Figura 4.4 apresenta-se um exemplo do uso da combinação MW para a detecção de *cycle slips* nas medidas de fase do sistema GPS. O painel esquerdo desta figura mostra a variação temporal da combinação MW, ϕ_6 , calculada utilizando as observáveis L e C do satélite G18 para a estação BELE³ (-1,40°S, -48,46°O) em 18/02/2015. Destaca-se a ocorrência de um *cycle slip* próximo às 00:18 UT, o qual reflete na perda de continuidade do sinal. No painel direito, apresenta-se a o desvio padrão amostral de ϕ_6 calculado para os mesmos dados. Neste gráfico, a linha pontilhada destaca uma descontinuidade no desvio de ϕ_6 , representando um *cycle slip* da ordem de 1 ciclo na escala do eixo vertical.

³ Informações sobre as estações GNSS estão disponíveis no Anexo A.

Figura 4.4 – Exemplo de detecção de saltos de ciclo nas medidas de fase do sistema GPS utilizando a combinação MW. Painel esquerdo: variação temporal do ϕ_6 calculado utilizando as observáveis L e C do satélite G18 para a estação BELE em 18/02/2015. Painel direito: desvio padrão amostral de ϕ_6 apresentando um cycle slip próximo às 00:18 UT (linha vertical pontilhada).



Fonte: Produção do autor.

Após a obtenção de ϕ_6 para os pares de frequências linearmente independentes, a detecção de *cycle slips* é feita por meio do cálculo do desvio padrão amostral da série de dados de cada satélite. Dessa forma, um *cycle slip* é declarado quando uma amostra difere do valor médio considerando um limiar pré-definido estatisticamente de acordo com os dados utilizados (neste caso, 1 ciclo). Nesta etapa, os intervalos de dados contendo *cycle slips* são demarcados para a posterior consideração. Adicionalmente, a análise das observáveis é realizada no sentido temporal progressivo e regressivo, até que não sejam mais encontrados *cycle slips*.

4.3.3 Terceira etapa: obtenção de medidas de fase e pseudodistância corrigidas

Após identificar as amostras com *cycle slips* nas medidas de fase dos pares de frequência utilizados, são demarcados os intervalos com amostras contínuas, ou seja, sem *cycle slips*. Em seguida, é realizado o cálculo da combinação livre de ionosfera (IF, do inglês *Ionosphere Free*) para cada um dos intervalos de medidas contínuas de fase. Essa combinação linear elimina o termo de primeira ordem do atraso ionosférico da trajetória satélite-receptor. Assim, a combinação IF proporciona uma estimativa da variabilidade das observáveis dentro do intervalo contínuo, denominada ϕ_3 . Este parâmetro pode ser

calculado utilizando ambas as observáveis L e C, de acordo com as Equações (4.34) e (4.35), respectivamente:

$$\phi_3^L = \frac{1}{f_a^2 - f_b^2} (f_a^2 L_a - f_b^2 L_b) \quad , \quad (4.34)$$

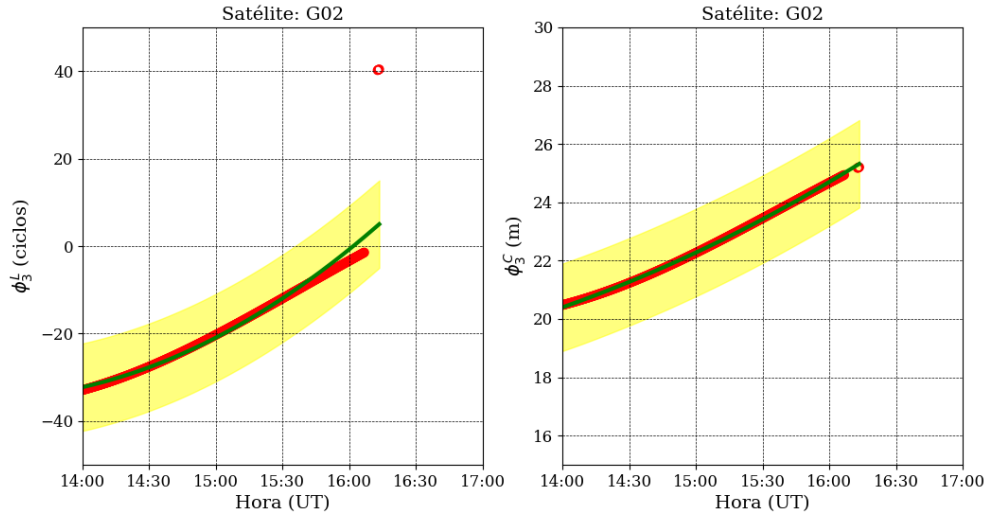
$$\phi_3^C = \frac{1}{f_a^2 - f_b^2} (f_a^2 C_a - f_b^2 C_b) \quad , \quad (4.35)$$

onde ϕ_3^L e ϕ_3^C representam a magnitude da combinação IF para as medidas de fase (L) e pseudodistância (C), respectivamente.

Após calcular a combinação IF nos intervalos de medidas definidos utilizando a combinação MW, é realizado um ajuste polinomial de baixa ordem sobre as combinações lineares obtidas utilizando as observáveis L e C. Os *outliers* são eliminados por meio da comparação entre o valor amostral de L e C com seu respectivo valor ajustado, considerando um limiar estatisticamente pré-definido, calibrado de acordo com os dados de entrada e avaliado por meio do cálculo do valor médio quadrático (RMS, do inglês *Root Mean Square*) (DACH et al., 2015; MENDOZA et al., 2019b).

Na Figura 4.5 é apresentado um exemplo da aplicação da combinação IF para a remoção de outliers nas variáveis L e C do satélite G02 para a estação BELE em 18/02/2015. No painel esquerdo, é exibido o gráfico da variação temporal da combinação IF para a variável L, enquanto o painel direito apresenta os dados relacionados à variável C. Em ambos os gráficos, a linha vermelha representa os valores de ϕ_3 , ao passo que a linha verde representa um ajuste polinomial de ordem dois. Os intervalos inferior e superior dos polinômios foram estabelecidos com base em uma variação de 33% acima e abaixo do valor do ajuste. Ressalta-se que os ajustes são feitos considerando cada intervalo de observações contínuas. Dessa forma, todos os valores que se encontram fora do intervalo definido pelos limites superior e inferior do ajuste são considerados *outliers*. Neste exemplo, foi identificado um *outlier* próximo às 16:14 UT nos valores da observável L.

Figura 4.5 – Exemplo da aplicação da combinação IF para remoção de outliers nas observáveis L e C do satélite G02 (estação BELE, 18/02/2015). Painel esquerdo: combinação IF para a observável L. Painel direito: combinação IF para a observável C. Em ambos os gráficos, a área destacada em amarelo representa os limites do ajuste polinomial, e os pontos fora dessa região representam os *outliers*.



Fonte: Produção do autor.

Após o procedimento descrito, obtém-se um conjunto de medidas pré-processadas de fase, $L_{sr,c}$ (em ciclos), e pseudodistância, $C_{sr,c}$ (em metros) entre cada satélite, s , e receptor, r , para cada canal GNSS, c . Essas medidas com *outliers* eliminados e *cycle slips* demarcados serão posteriormente utilizadas no cálculo do TEC utilizando o modelo ionosférico de camada unitária.

4.4 Nivelamento e modelagem das medidas de fase

Após o pré-processamento das observáveis correspondentes a cada par de satélite, s , e receptor, r , e para cada par de frequências, a e b , é feito o nivelamento dessas observáveis utilizando a combinação livre de geometria, GF (MENDOZA et al., 2019b). Nesse contexto, o conjunto de todas as combinações GF possíveis de pares de frequência linearmente independentes, $\{L_{GF,sr,ab}\}$ (em metros), é obtido por meio da Equação (4.36):

$$\{L_{GF,sr,ab}\} = L_{GF,sr,ab} - \langle L_{GF,sr,ab} - C_{GF,sr,ab} \rangle \quad (4.36)$$

onde o termo $L_{GF, sr, ab} = \lambda_a \phi_{3, sr, a} - \lambda_b \phi_{3, sr, b}$ corresponde à combinação GF não-nivelada utilizando as medidas de fase, L (em ciclos), e o termo $C_{GF, sr, ab} = C_{sr, a} - C_{sr, b}$ corresponde à GF calculada utilizando as medidas de pseudodistância, C (em metros). Os termos λ_a e λ_b representam, respectivamente, os comprimentos de onda de cada banda de frequência. O termo $\langle L_{GF, sr, ab} - C_{GF, sr, ab} \rangle$ representa a média das diferenças entre as combinações de L e C calculada considerando cada um dos intervalos de observações contínuas (arcos). Além disso, cada observação de GF é ponderada de acordo com três fatores: a elevação do satélite, o comprimento de cada arco contínuo e a constelação GNSS correspondente (GPS, GLONASS, Galileo ou BeiDou) (REN et al., 2016).

O conjunto completo de observações de GF pode ser representado pela Equação (4.37):

$$\{L_{GF, sr, ab}\} = \alpha_{ab} MF(z) VTEC(\mu, t) + IFB_{sr, ab} \quad (4.37)$$

Na Equação (4.5), o termo $MF(z)$ representa a função de mapeamento do modelo de camada unitária modificado (MSLM⁴, do inglês *Modified Single-Layer Model*), o termo z representa a distância zenital (em radianos) entre o satélite, s , e o receptor, r . O termo α_{ab} representa uma constante de proporcionalidade (em metros/TECU, onde $1TECU = 10^{16} \text{elétrons livres}/m^2$), representada na Equação 4.38, a seguir:

$$\alpha_{ab} = 40,3 \times 10^{16} \left(\frac{1}{f_a^2} - \frac{1}{f_b^2} \right) \quad (4.38)$$

Finalmente, o termo $IFB_{sr, ab}$ da Equação (4.37) representa o erro sistemático denominado IFB (do inglês *inter-frequency bias*) entre medidas de pseudodistância de cada banda de frequência utilizada. Nesse contexto, os IFBs referem-se às diferenças nos atrasos de hardware observados nas observáveis GNSS. Essas diferenças ocorrem devido a variações nas frequências do sinal, nos canais de rastreamento e nas tecnologias utilizadas nos receptores e satélites GNSS (MONICO, 2008; SPITS, 2012; DACH et al., 2015). O IFB também é conhecido como viés instrumental e pode ser observado tanto

⁴ Maiores detalhes no Apêndice B.

nos satélites quanto nos receptores GNSS. Maiores detalhes sobre o cálculo do IFB são apresentados na Subseção 4.2.1.

4.4.1 Cálculo dos erros sistemáticos (DCBs/ IFBs)

Dentre os erros capazes de afetar as observáveis GNSS, os atrasos de hardware nos satélites e receptores são especialmente significativos (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001). Esses atrasos têm como principal causa a variabilidade dos componentes eletrônicos dos dispositivos, considerando parâmetros como temperatura e frequência (e.g. impedância) (LEANDRO, 2009). Dessa forma, o atraso de hardware do satélite refere-se ao tempo necessário para o sinal ser gerado e transmitido pelo satélite. Por outro lado, o atraso de hardware do receptor é o tempo que leva para o sinal ser recebido e correlacionado no receptor (ODIJK, 2002). Esses atrasos dependem diretamente do tipo de observável (e.g. L, C, S, D) como uma função de temperatura e frequência (SPITS, 2012). Nesse contexto, o atraso entre as pseudodistâncias de cada portadora é conhecido como atraso de grupo (T_{GD} , do inglês *Transmitter Group Delay*), o qual é disponibilizado aos usuários de sistemas GNSS por meio das mensagens de navegação (KAPLAN; HERGARTY, 2006). Uma vez conhecido o T_{GD} , é possível calcular o atraso das medidas de pseudodistância (DCB, do inglês *Differential Code Bias*) entre duas bandas de frequência, a e b . Assim, o DCB (em ns) de um determinado satélite, $DCB_{a,b}^s$, é calculado utilizando a Equação (4.39) (SPITS, 2012):

$$DCB_{a,b}^s = \frac{1}{c} (d_{s,c,a} - d_{s,c,b}) \quad (4.39)$$

$$DCB_{a,b}^s = \frac{f_a^2 - f_b^2}{f_b^2} T_{GD} \quad (4.40)$$

onde os termos $d_{s,c,a}$ e $d_{s,c,b}$ representam os atrasos de hardware da pseudodistância no satélite para as frequências a e b , respectivamente.

Por outro lado, o DCB em um determinado receptor é calculado utilizando a Equação (4.41) (SPITS, 2012):

$$DCB_{a,b}^r = \frac{1}{c}(d_{r,c,a} - d_{r,c,b}) \quad , \quad (4.41)$$

Na Equação (4.41), os termos $d_{r,c,a}$ e $d_{r,c,b}$ representam os atrasos de hardware da pseudodistância no receptor para as frequências a e b , respectivamente.

Após o cálculo dos DCBs para satélite e receptor, é possível obter uma estimativa do erro inter-frequência (IFB), que é utilizado posteriormente no cálculo do TEC calibrado (MENDOZA et al., 2019). Os IFBs são definidos como diferenças sistemáticas nas medições de pseudodistância entre diferentes bandas de frequência. Essas diferenças podem ser influenciadas por diversos fatores, sendo os atrasos de hardware um dos principais responsáveis (PROL; CAMARGO, 2014; WANG et al., 2021).

Assim, o IFB entre um determinado satélite, s , e um receptor, r , entre duas frequências, a e b , pode ser obtido por meio da Equação (4.42) (SPITS, 2012):

$$IFB(C)_{a,b}^{sr} = d_{s,a} - d_{s,b} + d_{r,c,a} - d_{r,c,b} \quad (4.42)$$

De maneira análoga, o IFB também pode ser obtido para os atrasos de hardware das medidas de fase, conforme demonstrado na Equação (4.43) (SPITS, 2012):

$$IFB(L)_{a,b}^{sr} = d_{s,L,a} - d_{s,L,b} + d_{r,L,a} - d_{r,L,b} \quad (4.43)$$

onde os termos $d_{s,L,a}$ e $d_{s,L,b}$ representam os atrasos de hardware das medidas de fase no satélite, enquanto os termos $d_{r,L,a}$ e $d_{r,L,b}$ correspondem aos atrasos de hardware das medidas de fase no receptor.

4.5 Cálculo do TEC utilizando observáveis corrigidas

Após a correção das observáveis C e L utilizando as combinações lineares em pares de frequência linearmente independentes e a calibração dos erros sistemáticos, é possível calcular o TEC utilizando a função de mapeio do MSLM, o conjunto de amostras da combinação livre de geometria e os valores de IFB para cada par de frequências utilizado. Assim, o VTEC no IPP da trajetória entre um satélite, s , e um receptor, r , para um par de frequências, a e b , pode ser estimado por meio da Equação (4.44) (MENDOZA et al., 2019):

$$VTEC_{sr,ab,\varphi_{IPP}\lambda_{IPP}} = (\alpha_{ab}MF(z))^{-1}(\{L_{GF,sr,ab}\} - IFB(C)_{a,b}^{sr}) \quad (4.44)$$

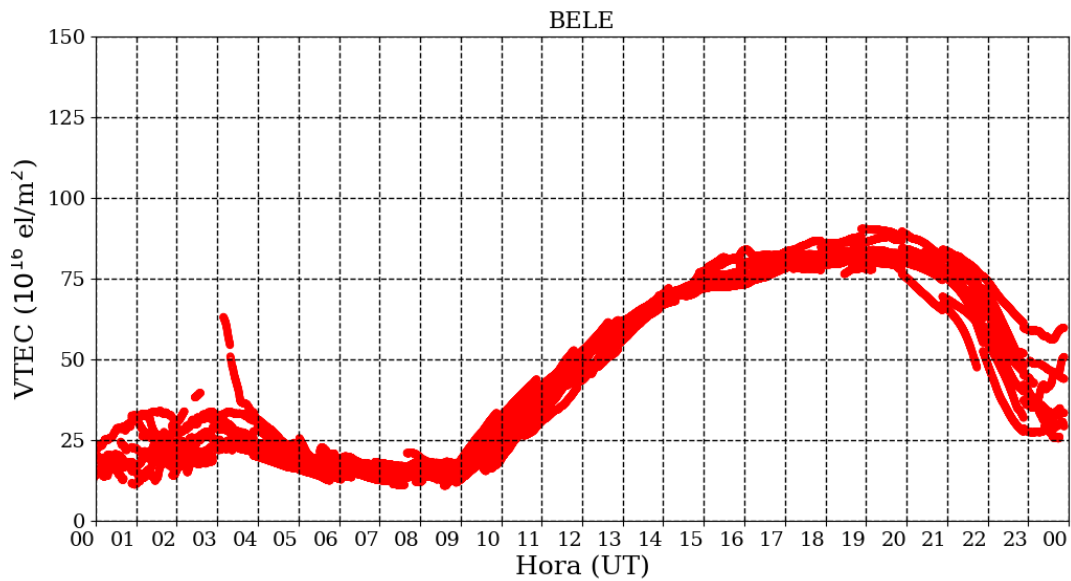
onde os termos φ_{IPP} e λ_{IPP} representam a latitude e longitude geográfica do IPP.

Adicionalmente, o STEC pode ser obtido por meio da Equação (4.45):

$$STEC_{sr,ab,\varphi_{IPP}\lambda_{IPP}} = (\alpha_{ab})^{-1}(\{L_{GF,sr,ab}\} - IFB(C)_{a,b}^{sr}) \quad (4.45)$$

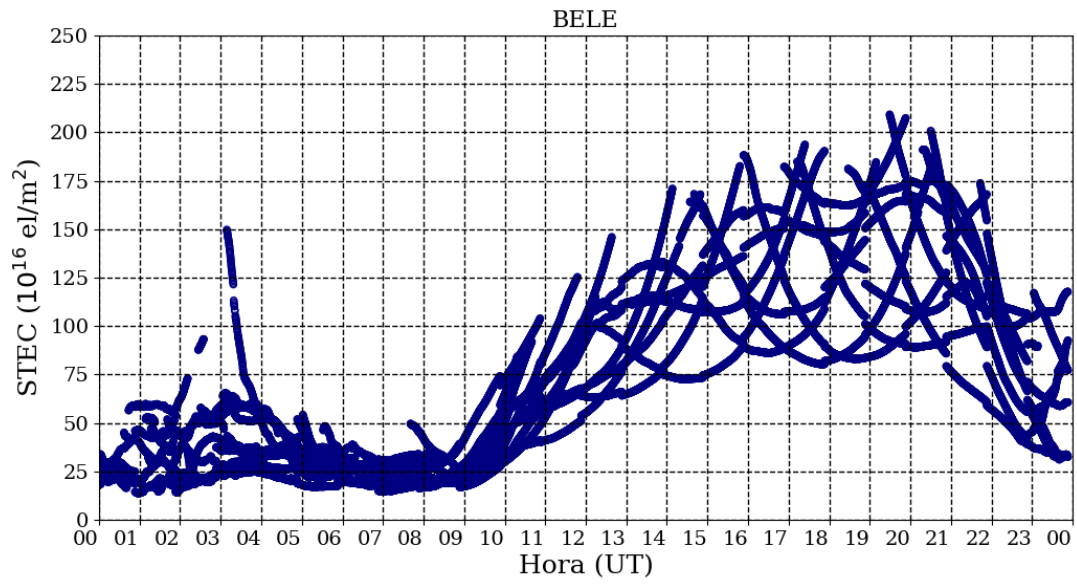
Nas Figuras 4.6 e 4.7 apresentam-se, respectivamente, exemplos de dados de VTEC e STEC obtidos por meio da aplicação da metodologia descrita neste capítulo, utilizando dados da estação BELE em 18/02/2015.

Figura 4.6 – Variação temporal do VTEC para a estação BELE em 18/02/2015.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.7 – Variação temporal do STEC para a estação BELE em 18/02/2015.



Fonte: Produção do autor.

5 METODOLOGIA: ANÁLISE DAS PERTURBAÇÕES IONOSFÉRICAS ASSOCIADAS A EPBS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para analisar perturbações ionosféricas associadas a eventos de EPBs sobre a América Latina no período de janeiro de 2015 a maio de 2023. Este período abrange desde a fase pós-pico do ciclo solar 24 até a fase ascendente do ciclo 25, que tem previsão de alcançar seu máximo de atividade solar em julho de 2024 (NOAA, 2023). Portanto, nas seções a seguir apresentam-se de forma detalhada os aspectos metodológicos utilizados para analisar a amplitude, a morfologia e a variabilidade das perturbações ionosféricas durante o período de estudo. Na Seção 5.1 é feita uma descrição completa da metodologia utilizada para quantificar as perturbações ionosféricas observadas ao longo do período de estudo. É dada ênfase à obtenção do grau de perturbação da ionosfera por meio do índice DIX, incluindo as etapas que envolvem a elaboração de DIXMAPs sobre a América Latina partindo dos dados de TEC obtidos para estações GNSS de forma individual. Finalmente, a Seção 5.2 descreve as técnicas de análise das perturbações ionosféricas associadas a EPBs conforme seu comportamento observado no índice DIX. Dessa forma, apresentam-se as técnicas de derivação dos parâmetros morfológicos das EPBs, tais como sua extensão latitudinal, intensidade de depleção e amplitude de assimetrias inter-hemisféricas observadas.

5.1 Análise do grau de perturbação da ionosfera utilizando o índice DIX

5.1.1 Cálculo do DIX

O índice de perturbação da ionosfera (DIX, do inglês *Disturbance Ionosphere indeX*) foi inicialmente proposto por Jakowski et al. (2006) e posteriormente aprimorado por meio da inclusão e modificação de novos parâmetros (JAKOWSKI et al., 2012a, 2012b; JAKOWSKI; HOQUE, 2019; WILKEN et al., 2018; PIKANÇO, 2019; DENARDINI et al., 2020a; BARBOSA-NETO, 2020). Este índice representa o grau de perturbação da ionosfera durante diferentes condições do clima espacial e tem como base a variação do TEC em relação a um valor de referência não perturbado.

Picanço (2019) desenvolveu uma nova equação para o DIX, incorporando novos termos com o objetivo de aumentar a sensibilidade do índice a uma variedade de fenômenos do clima espacial. Nesse sentido, o autor calculou o DIX para estações GNSS localizadas na

região Brasileira durante períodos geomagneticamente perturbados, analisando o grau de perturbação da ionosfera equatorial e de baixas latitudes. Posteriormente, [Barbosa-Neto \(2020\)](#) expandiu a aplicação do DIX para compreender o grau de perturbação da ionosfera em toda a região da América do Sul, resultando na criação dos DIXMAPs (do inglês, *Disturbance Ionosphere indeX MAP*). Essa técnica possibilitou a identificação de perturbações ionosféricas regionais e suas variações ao longo das latitudes e longitudes durante períodos geomagneticamente perturbados.

[Denardini et al. \(2020b\)](#) também utilizaram os DIXMAPs para analisar a resposta da ionosfera a um evento de tempestade geomagnética. Durante esse estudo, foi possível identificar a presença de eventos de EPBs, geradas após a penetração de campos elétricos perturbados no horário do pôr do Sol. Posteriormente, [Picanço et al. \(2022\)](#) utilizaram o índice DIX para avaliar a intensidade de EPBs em função da atividade solar. A sensibilidade do DIX às EPBs foi uma das motivações para a realização do presente trabalho, com o intuito de investigar o grau de perturbação da ionosfera associado à presença desses fenômenos durante períodos geomagneticamente calmos.

Neste trabalho, utilizamos a metodologia do DIX apresentada em [Picanço et al. \(2019\)](#), [Denardini et al. \(2020a\)](#) e [Barbosa-Neto \(2020\)](#) para analisar as respostas ionosféricas a eventos de EPBs selecionados no período de janeiro de 2015 a maio de 2023, abrangendo a fase pós-pico do ciclo solar 24 até a fase ascendente do ciclo 25. Ressalta-se que, dentro do período de estudo, são excluídos os dias geomagneticamente perturbados, nos quais o somatório diário do índice K_p seja maior do que 24. Dessa forma, este trabalho analisa as perturbações ionosféricas associadas às EPBs em períodos geomagneticamente calmos, sendo o primeiro estudo realizado com esse objetivo utilizando o índice DIX. Adicionalmente, realiza-se uma análise das perturbações ionosféricas associadas a EPBs tendo como foco sua variabilidade sazonal, latitudinal, longitudinal e em função da atividade solar.

A definição do DIX é dada pela Equação (5.1), a seguir:

$$DIX_k(t) = \left| \frac{\alpha_k(\Delta TEC_k(t)/TEC_k^{Qd}(t)) + \Delta TEC_k(t)}{\beta} \right| \quad (5.1)$$

onde $\Delta TEC_k(t) = TEC_k(t) - TEC_k^{Qd}(t)$ é a diferença entre o valor do TEC e o valor de referência não perturbado. Portanto, o termo $TEC_k(t)$ representa o TEC calculado a partir de um determinado satélite ($k = \varphi_{IPP}, \lambda_{IPP}$) em uma determinada época, t . O termo $TEC_k^{Qd}(t)$ representa o valor de referência não perturbado para o mesmo satélite e mesma época. Ressalta-se que o valor de $TEC_k^{Qd}(t)$ é calculado a partir da média móvel de três horas do TEC obtido durante o dia geomagneticamente mais calmo dentro de um período de 15 dias, conforme descrito por [Picanço et al. \(2020\)](#). O termo α_k representa o valor de $TEC_k^{Qd}(t)$ para $t = 0$ (meia-noite local), considerando a longitude do IPP. Finalmente, o termo β corresponde a um coeficiente dependente da latitude magnética, usado para normalizar o valor do DIX em uma escala que varia de 0 a 5, considerando o estudo das perturbações ionosféricas máximas observadas durante períodos geomagneticamente perturbados do ciclo solar 24. Ressalta-se que os valores desse coeficiente são pré-determinados e podem ser obtidos em [Barbosa-Neto et al. \(2022\)](#).

Na Tabela 5.1, apresenta-se uma classificação dos estados da ionosfera de acordo com a faixa de variação do índice DIX ([PICANÇO, 2019](#); [DENARDINI et al., 2020a](#)).

Tabela 5.1 – Classificação dos estados de perturbação da ionosfera com base nos valores observados no índice DIX.

Faixas de variação do DIX	Estado da ionosfera
[0 - 1]	Calma
[1 - 2]	Perturbação leve
[2 - 4]	Perturbação moderada
[4 - 5]	Perturbação intensa
> 5	Perturbação extrema

Fonte: Adaptado de [Picanço \(2019\)](#) e [Denardini et al. \(2020a\)](#).

Mediante o exposto, destaca-se que a metodologia do DIX proporciona um valor independente para cada satélite e época individuais, estando diretamente ligado à intensidade da perturbação ionosférica medida na posição do IPP. A magnitude da perturbação ionosférica registrada no DIX varia conforme a amplitude das mudanças no TEC em relação ao referencial não perturbado. Essa magnitude pode ser mais elevada,

como ocorre em eventos de tempestades geomagnéticas intensas, ou mais baixa, como é o caso das EPBs. Assim, é importante destacar que o DIX é um índice que responde simultaneamente a diversos fenômenos do clima espacial.

5.1.1.1 Validação do DIX durante EPBs

Para validar a capacidade do índice DIX em detectar perturbações ionosféricas associadas a EPBs, foram realizadas comparações com os valores do índice da taxa de variação do TEC (ROTI, do inglês *Rate Of change of TEC Index*) durante eventos pré-selecionados, em conjunto com outros dados observacionais. O ROTI é um índice ionosférico desenvolvido por [Pi et al. \(1997\)](#) com o intuito de propor uma ferramenta simples para a quantificação de flutuações de fase em sinais GNSS, um efeito frequentemente associado à presença de irregularidades ionosféricas na trajetória satélite-receptor. Atualmente, o ROTI é um dos índices mais utilizados no estudo de EPBs, uma vez que apresenta forte correlação com a ocorrência de irregularidades ionosféricas. Nesse contexto, diversos estudos podem ser encontrados na literatura científica sobre o uso do ROTI para o estudo de irregularidades do plasma em diversos setores latitudinais e longitudinais, o que demonstra que este é um índice que possui alta confiabilidade na avaliação de fenômenos desse tipo ([BUHARI et al., 2017](#); [DE JESUS et al., 2020](#); [TANG et al., 2021](#); [LI et al., 2022](#); [CARMO, 2022](#)). Por esse motivo, este trabalho utilizou o ROTI como o principal parâmetro de validação para o DIX, tendo como objetivo avaliar sua capacidade em detectar a resposta ionosférica a eventos de bolhas de plasma em termos da variabilidade observada no cálculo do TEC.

O ROTI é calculado a partir da taxa de variação do TEC (ROT, do inglês *Rate Of change of TEC*). O ROT tem sido amplamente utilizado para medir os efeitos das irregularidades ionosféricas sobre os sinais GNSS desde o início dos anos 1990 ([WANNINGER, 1993](#); [DOHERTY et al., 1994](#); [AARONS et al., 1996](#)). Na prática, o ROT representa uma medida das flutuações de fase dos sinais GNSS em função da variabilidade temporal de um determinado intervalo contínuo de observações de TEC, conforme mostrado na Equação (5.2) a seguir, baseada em [PI et al., 1997](#):

$$ROT_k(t) = \frac{STEC_k(t_2) - STEC_k(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (5.2)$$

onde t é o tempo de observação e $STEC_k(t_{1,2})$ representa o STEC calculado a partir de um determinado satélite GNSS ($k = \varphi_{IPP}, \lambda_{IPP}$), em períodos específicos, t_1 e t_2 . O ROT é dado na unidade de TEC/min, onde $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elétrons/m}^2$. Finalmente, o ROTI corresponde à variação amostral do ROT em relação a uma média calculada considerando uma escala de tempo específica, conforme apresentado na Equação (5.3) a seguir:

$$ROTI_k(t) = \sqrt{\langle (ROT_k(t))^2 \rangle - \langle ROT_k(t) \rangle^2} \quad (5.3)$$

Ressalta-se que a escala média escolhida para o cálculo do ROTI neste trabalho foi de 2,5 minutos, seguindo a metodologia apresentada em [Carmo et al. \(2021\)](#). Neste estudo, o cálculo do ROTI foi realizado de maneira individualizada para cada satélite e para cada constelação GNSS (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou). Dessa forma, foram considerados somente intervalos com observações contínuas de TEC, denominados arcos. Na presença de interrupções nos dados (*data gaps*), um novo arco de observações foi definido, de modo a mitigar a perda de dados e a propagação de *outliers*. É importante enfatizar que, quando são identificados *outliers* residuais dentro dos arcos, um polinômio de baixa ordem é ajustado no conjunto de observações. Posteriormente, são definidos os limites superior e inferior do ajuste, por meio de um valor limiar previamente definido ($\sim 10 \text{ TECU/min}$). Assim, observações que se encontrem fora desses limites são consideradas *outliers* e, portanto, excluídas do conjunto de dados. Este novo procedimento assegura a qualidade dos dados obtidos por meio da metodologia do ROTI, garantindo uma análise mais precisa e confiável das variações de TEC associadas à presença de EPBs.

Em suma, a metodologia de validação do DIX no estudo de EPBs foi realizada por meio da comparação deste índice com outras técnicas já bem estabelecidas na literatura científica. Especificamente, foram utilizados dados do índice ROTI, imageadores All-Sky e ionossondas, os quais foram previamente selecionados considerando dias geomagneticamente calmos com ocorrência de EPBs. Assim, o comportamento do DIX sobre diferentes estações e setores latitudinais foi comparado à resposta específica de cada uma das técnicas de referência.

Na Tabela 5.2, apresenta-se uma lista das estações terrestres utilizadas nesta validação, juntamente com suas localizações geográficas e os tipos de instrumentos disponíveis. Os instrumentos foram selecionados considerando duas regiões latitudinais: a faixa equatorial e a região da crista sul da EIA. Dessa forma, utilizaram-se dados GNSS obtidos de seis receptores, sendo três destes situados nas proximidades da região equatorial (PBCG, PEAf e PBJP) e três nas proximidades da crista sul da EIA (SJSP, MGIN e UBA1). Além disso, foram selecionados dois pares de instrumentos, cada um composto por um imageador All-Sky (ASI) e uma ionossonda (IONO). Nesse contexto, considerou-se um par ASI-IONO próximo à região equatorial (FZA0M e CA) e outro próximo à crista sul da EIA (CAJ2M e CP). Ressalta-se que parte dos resultados desta validação pode ser encontrado no estudo publicado por [Picanço et al. \(2022\)](#).

Tabela 5.2 – Relação de instrumentos utilizados na validação metodológica do índice DIX durante eventos de EPBs. Destacam-se as localizações geográficas das estações utilizadas e o tipo de instrumento utilizado.

Estação (código)	Instrumento	Latitude (°)	Longitude (°)
Campina Grande (PBCG)	GNSS	-7,21	-35,90
João Pessoa (PBJP)	GNSS	-7,13	-34,87
Afogados da Ingazeira (PEAF)	GNSS	-7,76	-37,63
São José dos Campos (SJSP)	GNSS	-23,20	-45,86
Ubatuba (UBA1)	GNSS	-23,50	-45,11
Inconfidentes (MGIN)	GNSS	-22,31	-46,32
Cachoeira Paulista (CP/CAJ2M)	ASI + IONO	-22,68	-44,98
Fortaleza (FZA0M)	IONO	-3,71	-38,54
São João do Cariri (CA)	ASI	-7,39	-36,53

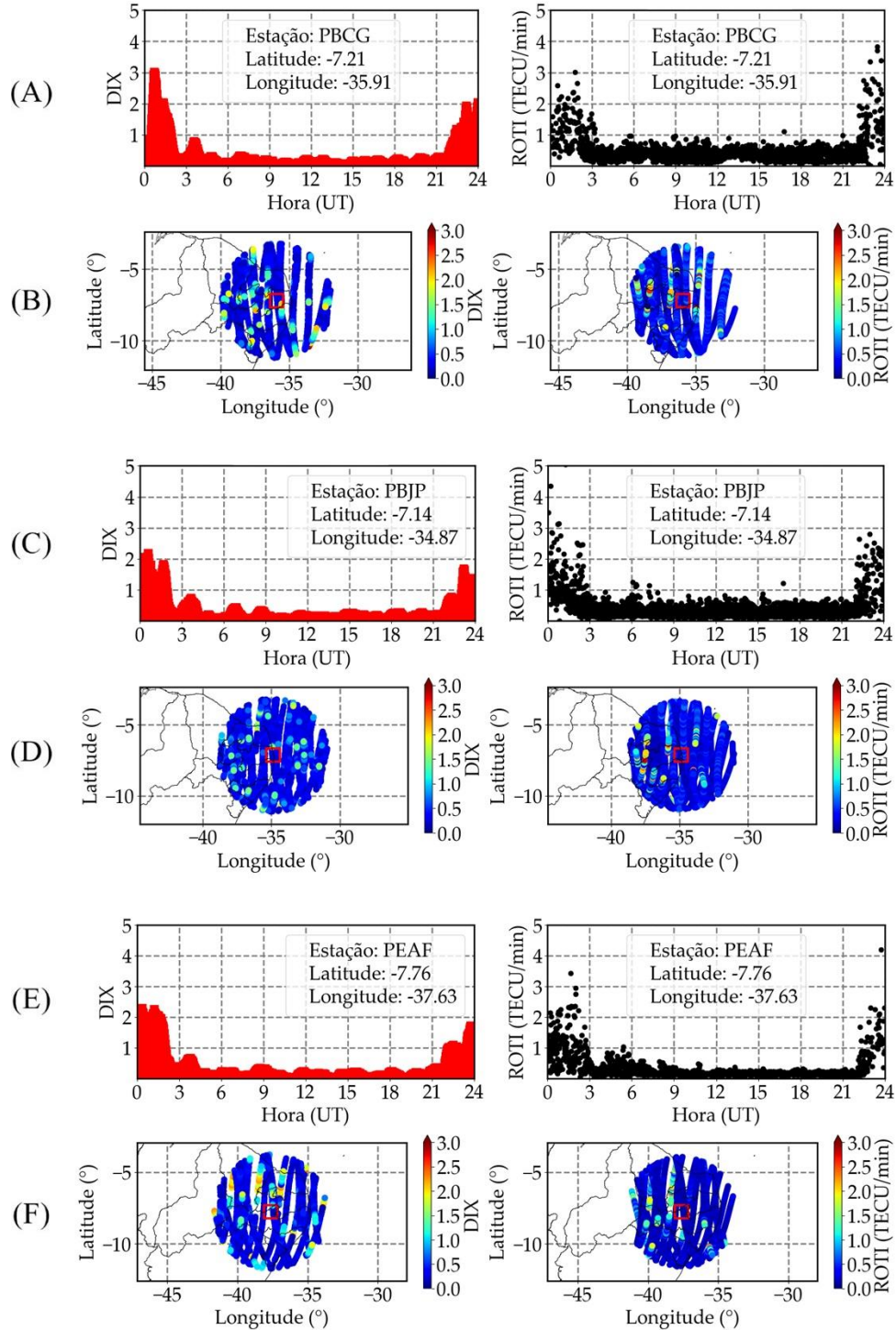
Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.1 apresentam-se exemplos de resultados da comparação entre os índices DIX (barras em vermelho) e ROTI (pontos em preto), obtidos para as estações próximas à região equatorial (A: PBCG, C: PBJP e E: PEAf), para o dia 12/02/2016. Adicionalmente, são apresentados mapas com as trajetórias dos IPPs (pontos em azul) obtidos por meio das observáveis GNSS utilizadas para obter os índices ionosféricos. De

forma específica, esses mapas descrevem as posições das observações de DIX (painéis esquerdos) e de ROTI (painéis direitos) sobre as estações GNSS utilizadas (símbolos em vermelho, B: PBCG, D: PBJP e F: PEAFF).

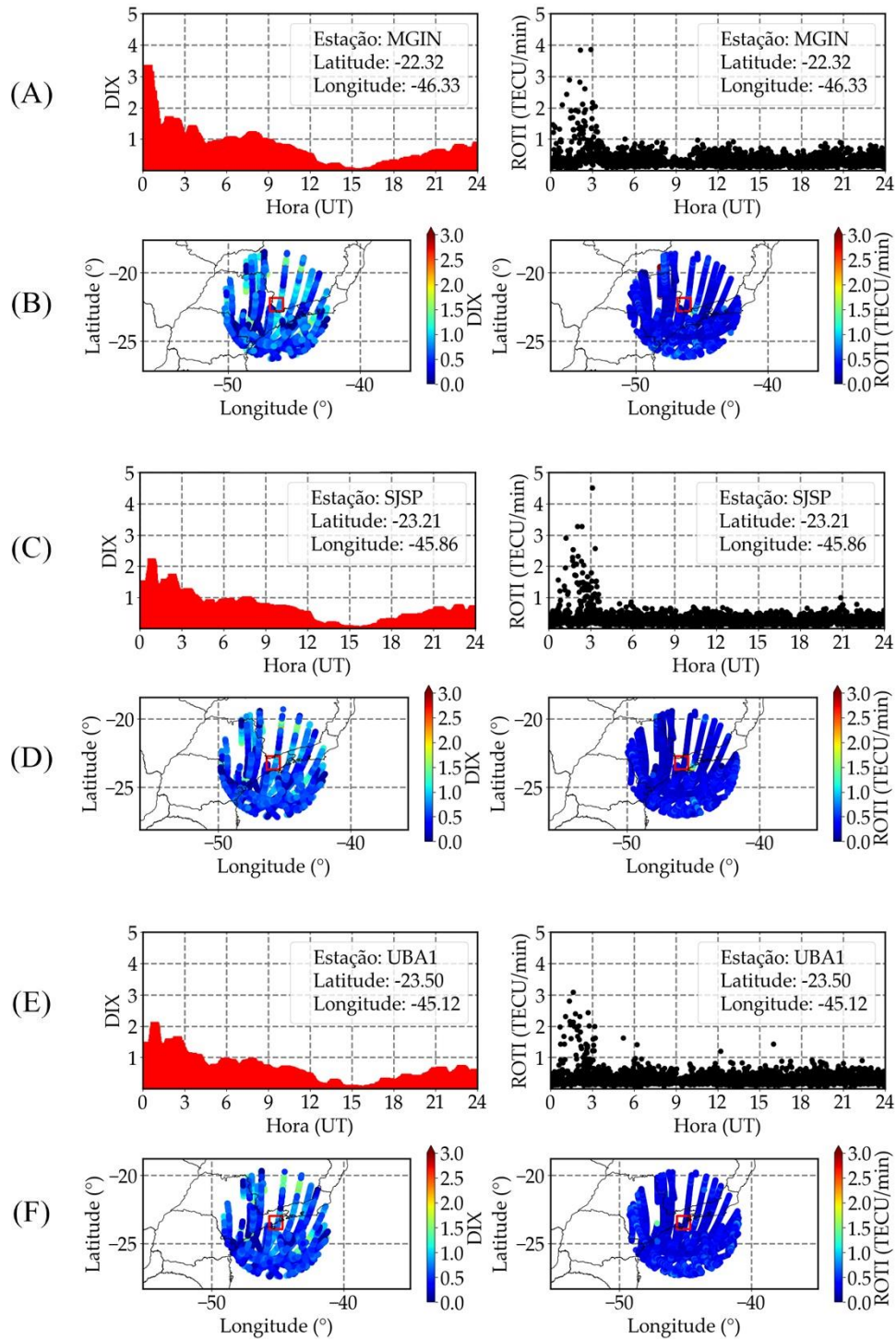
A Figura 5.2 mostra exemplos de resultados da comparação entre os índices DIX (barras em vermelho) e ROTI (pontos em preto), obtidos para as estações próximas à região da crista sul da EIA (A: MGIN, C: SJSP e E: UBA1), para o dia 12/02/2016. Também são apresentados mapas com as trajetórias dos IPPs (pontos em azul) obtidos por meio das observáveis GNSS utilizadas para calcular os índices DIX e ROTI. Ressalta-se que esses mapas descrevem as posições das observações de DIX (painéis esquerdos) e de ROTI (painéis direitos) sobre cada uma das três estações GNSS (símbolos em vermelho, B: MGIN, D: SJSP e F: UBA1).

Figura 5.1 – Comparação entre os gráficos de variação temporal dos índices DIX (barras em vermelho) e ROTI (pontos em preto) para as estações PBCG (painel ‘A’), PBJP (painel ‘C’) e PEAFF (painel ‘D’), juntamente com as trajetórias do IPP (painéis B, D e F) sobre as estações terrestres (símbolos em vermelho), ao longo do dia 12/02/2016.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.2 – Comparação entre os gráficos de variação temporal dos índices DIX (barras em vermelho) e ROTI (pontos em preto) para as estações MGIN (painel ‘A’), SJSP (painel ‘C’) e UBA1 (painel ‘D’), juntamente com as trajetórias do IPP (painéis B, D e F) sobre as estações terrestres (símbolos em vermelho), ao longo do dia 12/02/2016.



Fonte: Produção do autor.

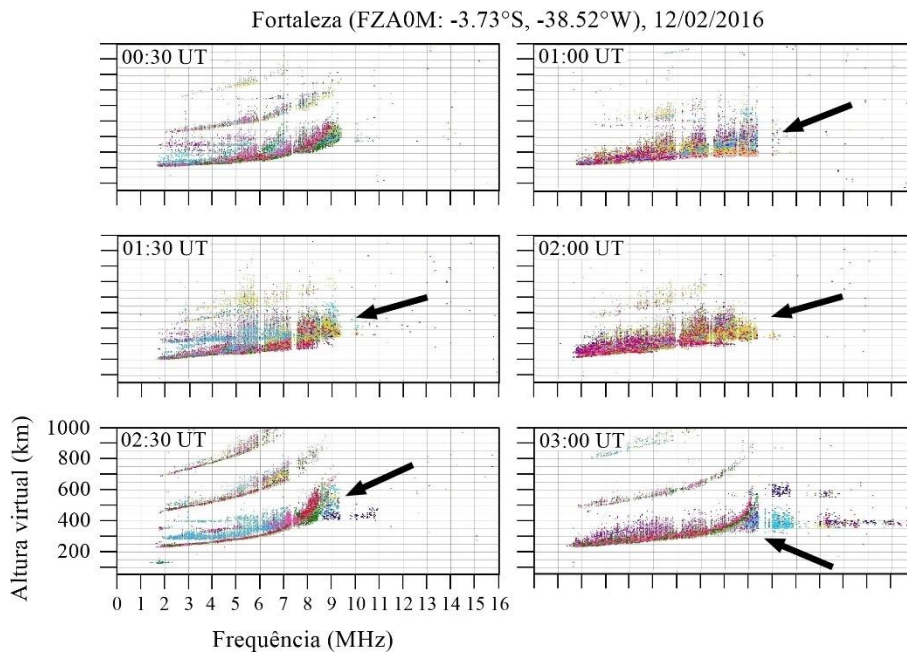
Diante das informações apresentadas nas Figuras 5.1 e 5.2, nota-se uma clara concordância entre os índices DIX e ROTI no período noturno do dia 12/02/2016. Isso pode ser observado nos gráficos que representam as estações da faixa equatorial e da crista sul da EIA. Por exemplo, nota-se uma intensificação nos valores do DIX entre 00:00 UT e ~04:00 UT e entre 21:00 UT e 24:00 UT, períodos em que a ocorrência de EPBs é geralmente alta (CARMO et al., 2023). Nesses intervalos de tempo, o índice DIX atinge a escala 2-3 nas estações PBCG, PBJP e PEAFF (painéis esquerdos das Figuras 5.1A, 5.1C e 5.1F, respectivamente), representando perturbações entre as escalas ‘leve’ e ‘moderada’. Adicionalmente, observa-se que o DIX apresenta um comportamento regressivo após a meia-noite local (03:00 UT) e progressivo após o pôr do Sol (21:00 UT). Isso indica que este índice possui forte correlação com os fenômenos que dependem da eletrodinâmica da ionosfera noturna, respondendo de forma gradativa à sua intensificação e/ou diminuição. Nesse contexto, ao se observar o comportamento do índice ROTI, percebe-se um comportamento característico da ocorrência de irregularidades ionosféricas, consistindo na sua intensificação na presença desses fenômenos (PI et al., 1997). Portanto, é razoável afirmar que o DIX é capaz de detectar as respostas ionosféricas de curta escala temporal associadas à presença de bolhas de plasma na região equatorial, considerando períodos geomagneticamente calmos.

Na Figura 5.2 é observado um comportamento similar ao exibido pelas estações GNSS localizadas na região equatorial. Nesse contexto, observa-se que os valores de DIX calculados para as estações próximas à crista sul da EIA também apresentam uma intensificação no intervalo entre 00:00 UT e ~04:00 UT, conforme visto nas estações MGIN, SJSP e UBA1 (painéis esquerdos das Figuras 5.2A, 5.2C e 5.2F, respectivamente). Porém, nota-se que os valores de DIX não diminuem imediatamente após o período de intensificação do ROTI (painéis esquerdos das Figuras 5.2A, 5.2C e 5.2F), mantendo-se na escala 1 nas horas seguintes. Isso pode estar relacionado à variabilidade da EIA, que tende a se modificar de um dia para o outro. Esse comportamento destaca a capacidade do DIX em detectar perturbações ionosféricas de diferentes escalas temporais, permitindo analisar de forma simultânea o comportamento “residual” da ionosfera, em função dos efeitos de bolhas de plasma, em conjunto com o comportamento “regional”, associado às mudanças de maior escala temporal, como a variabilidade da EIA (e.g. ABDU, 2005).

Para dar maior suporte à hipótese de que as variações observadas no DIX ocorrem devido à passagem de EPBs sobre as estações GNSS, apresentam-se a seguir dados de instrumentos observacionais nos quais identificam-se características específicas da ocorrência de EPBs, como variações da emissão do OI 630 nm (imageadores All-Sky) e o espalhamento de sinais eletromagnéticos (ionossondas).

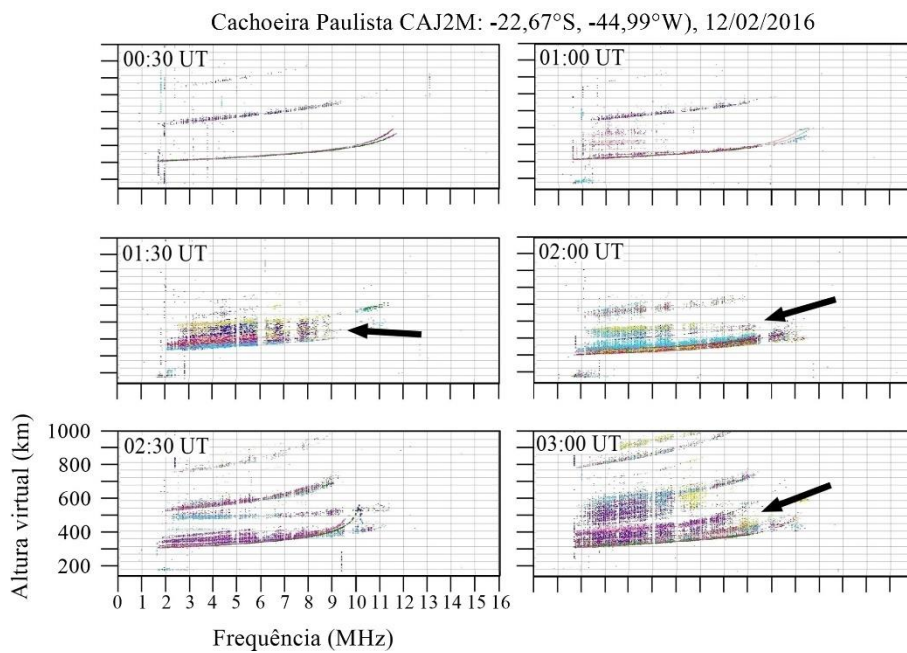
Nas Figuras 5.3 e 5.4, apresentam-se sequências de ionogramas obtidos por meio das ionossondas FZA0M e CAJ2M, localizadas próximo à região equatorial e à região da crista sul da EIA, respectivamente. Os ionogramas, obtidos no intervalo entre 00:30 UT e 03:00 UT, coincidem com os picos iniciais observados nos índices DIX e ROTI, apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2. Dessa forma, considerando os dados da ionossonda FZA0M (Figura 5.3), nota-se a ocorrência de Spread-F (setas pretas) no ionograma da altura virtual de reflexão em função da frequência emitida. Esse fenômeno consiste no “espalhamento” do sinal eletromagnético em diferentes camadas ionosféricas e possui forte relação com a presença de irregularidades ionosféricas/EPBs ([ABDU, 1993](#)). Por outro lado, ao considerar os dados da ionossonda CAJ2M, observa-se que o Spread-F ocorre posteriormente aos horários observados na ionossonda FZA0M. Esse comportamento tem relação direta com o sentido de propagação das bolhas de plasma, que surgem na região equatorial e se propagam para latitudes maiores por meio das linhas de campo geomagnético ([KELLEY, 2009](#); [PATIL et al., 2023](#)). Portanto, é esperado que o Spread-F apareça primeiro nos ionogramas obtidos da ionossonda instalada próximo à região equatorial (FZA0M) e posteriormente nos ionogramas da ionossonda localizada próximo à crista sul da EIA (CAJ2M), o que reforça a explicação do comportamento observado no índice DIX.

Figura 5.3 – Sequência de ionogramas obtidos utilizando dados da ionossonda localizada em Fortaleza (FZA0M), em 12/02/2016. As setas pretas indicam horários específicos em que foi observada a ocorrência de Spread-F no sinal transmitido.



Fonte: Produção do autor.

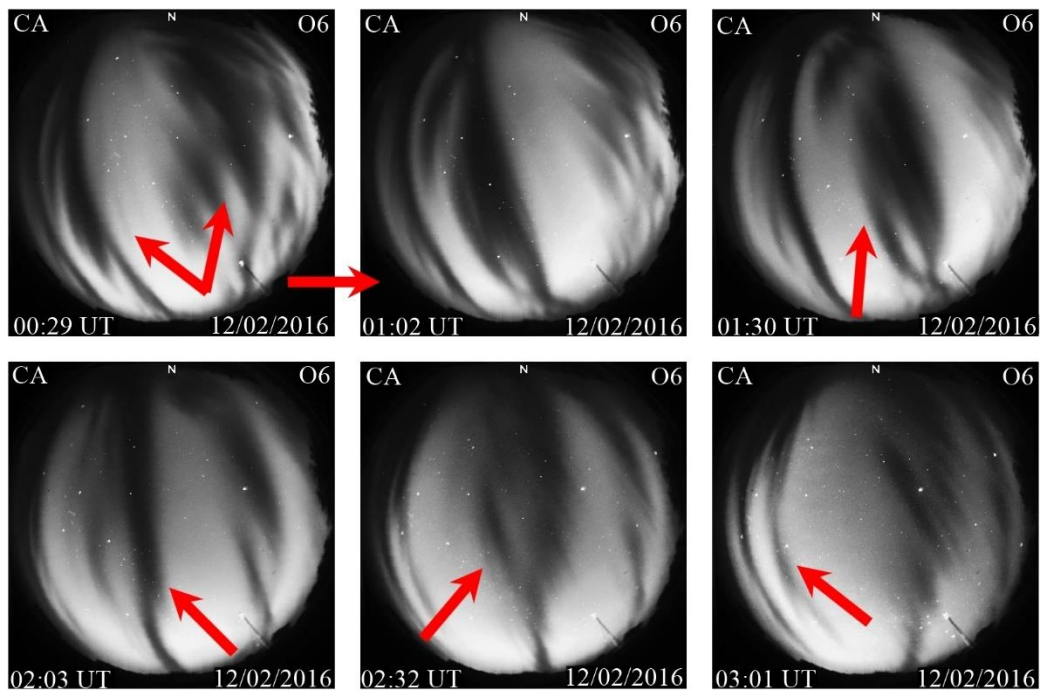
Figura 5.4 – Sequência de ionogramas obtidos utilizando dados da ionossonda localizada em Cachoeira Paulista (CAJ2M), em 12/02/2016. As setas pretas indicam horários com a ocorrência de Spread-F.



Fonte: Produção do autor.

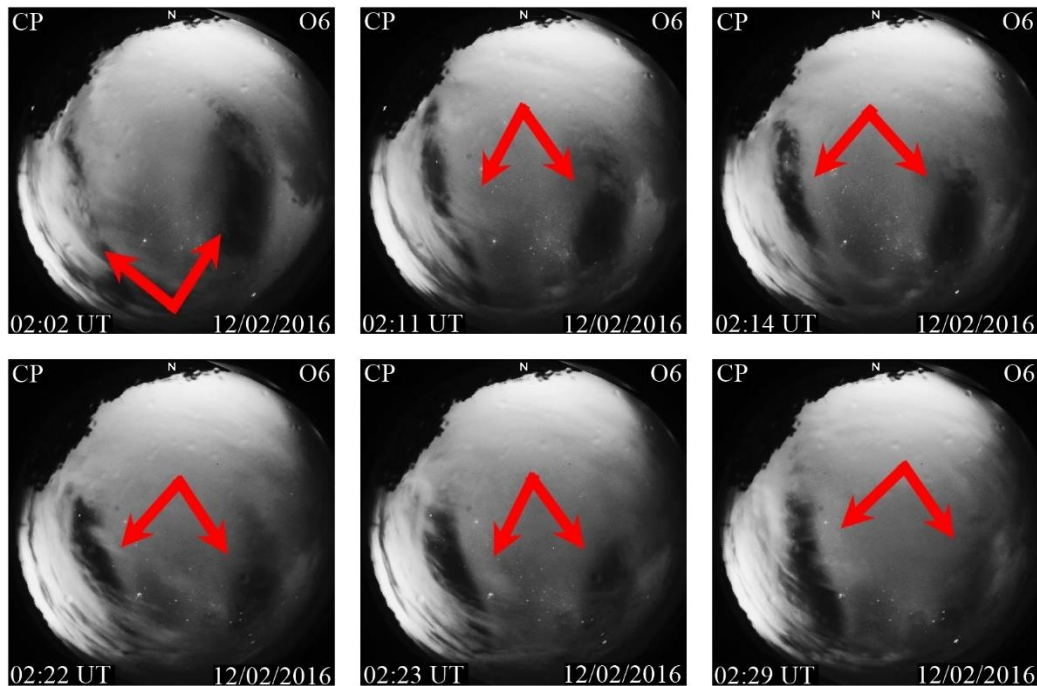
Nas Figuras 5.5 e 5.6, apresentam-se imagens de aeroluminescência na linha do OI 630 nm obtidas utilizando os imageadores CA e CP, respectivamente, no dia 12/02/2016. Nessas figuras, observam-se as assinaturas específicas (setas vermelhas) de bolhas de plasma próximo à região da ionosfera que se encontra sobre as estações GNSS da faixa equatorial e da região próxima à crista sul da EIA. Essas assinaturas podem ser observadas no intervalo entre 00:00 UT e 03:00 UT, o que está em acordo com o comportamento observado nas ionossondas e nos índices ionosféricos, DIX e ROTI.

Figura 5.5 – Imagens obtidas utilizando o ASI instalado em São João do Cariri (CA) em 12/02/16. As setas vermelhas destacam regiões com a presença de bolhas de plasma.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.6 – Imagens obtidas utilizando o ASI instalado em Cachoeira Paulista (CP) em 12/02/16. As setas vermelhas indicam a ocorrência de bolhas de plasma.



Fonte: Produção do autor.

Diante da análise apresentada e considerando os dados de ROTI, imageadores e ionossondas, é apropriado afirmar que o índice DIX é capaz de detectar a resposta ionosférica do TEC às EPBs em períodos geomagneticamente calmos e em diferentes faixas de latitude. A validação desta técnica é de grande importância para trazer maior confiabilidade aos resultados científicos obtidos por meio do uso desse índice. Isso permite assegurar que as perturbações ionosféricas observadas utilizando o índice DIX em condições de ionosfera noturna têm alta relação com as depleções de plasma associadas às EPBs. Portanto, é razoável também afirmar que a intensidade do DIX durante a ocorrência de EPBs tem relação direta com a amplitude da depleção de plasma sobre o campo de visão da estação GNSS utilizada no seu cálculo.

5.1.2 Estações GNSS utilizadas

Neste trabalho, foram utilizados dados de uma média de 450 estações GNSS distribuídas por toda a América Latina. Esses dados são de livre acesso e fazem parte das seguintes redes de observação:

- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC⁵, Brasil)
- University NAVSTAR Consortium (UNAVCO⁶, EUA)
- National Aeronautics and Space Administration (NASA⁷, EUA)
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG⁸, Alemanha)
- Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC⁹, Argentina)
- Servicio Geográfico Militar (SGM¹⁰, Uruguai)
- International GNSS Service (IGS¹¹, Internacional)
- Low-Latitude Ionospheric Sensor Network (LISN¹², Peru).

As observáveis GNSS obtidas a partir dos arquivos RINEX das estações disponíveis foram utilizadas no cálculo do TEC, seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 4 deste trabalho. Posteriormente, os dados de TEC obtidos foram utilizados no cálculo do índice DIX para cada estação de forma individual. Portanto, este trabalho utilizou dados do índice DIX calculados utilizando a totalidade de estações disponíveis, com uma taxa de amostragem de 15 segundos. Esses cálculos se basearam em quatro constelações de satélites GNSS: GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou.

Na Figura 5.7 apresentam-se as localizações geográficas das estações GNSS utilizadas neste trabalho. As estações são classificadas de acordo com a compatibilidade do receptor GNSS considerando as seguintes constelações: GPS (G: símbolos verdes), GPS e GLONASS (GR: símbolos em vermelho), GPS, GLONASS e Galileo (EGR: símbolos em azul) e GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou (símbolos em violeta).

⁵ <https://www.ibge.gov.br/>

⁶ <https://www.unavco.org/>

⁷ <https://www.nasa.gov/>

⁸ <https://www.bkg.bund.de/>

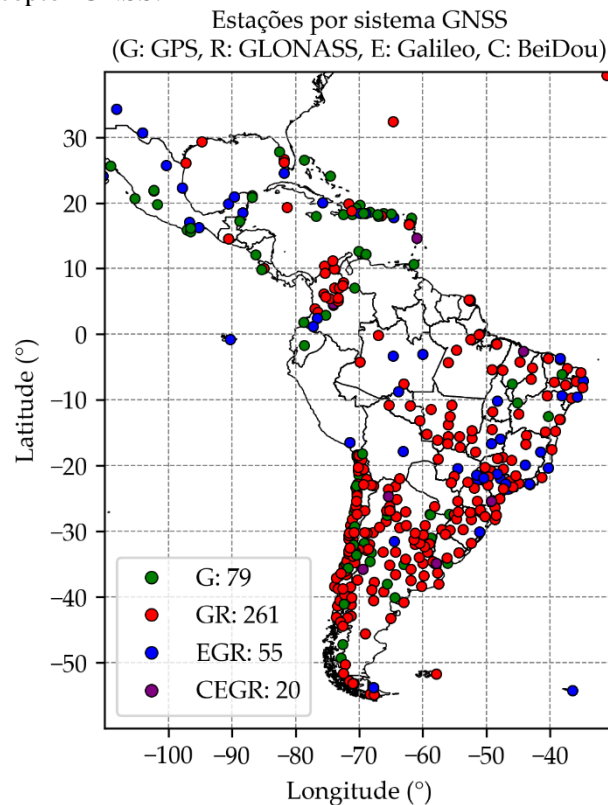
⁹ <https://www.ign.gob.ar/>

¹⁰ <http://www.igm.gub.uy/>

¹¹ <https://igs.org/>

¹² <http://lisn.igp.gob.pe/>

Figura 5.7 – Distribuição geográfica das estações disponíveis em função da compatibilidade do receptor GNSS.



Fonte: Produção do autor.

A lista completa de estações utilizadas, juntamente com suas coordenadas geográficas e códigos de identificação, pode ser acessada no Anexo A deste trabalho.

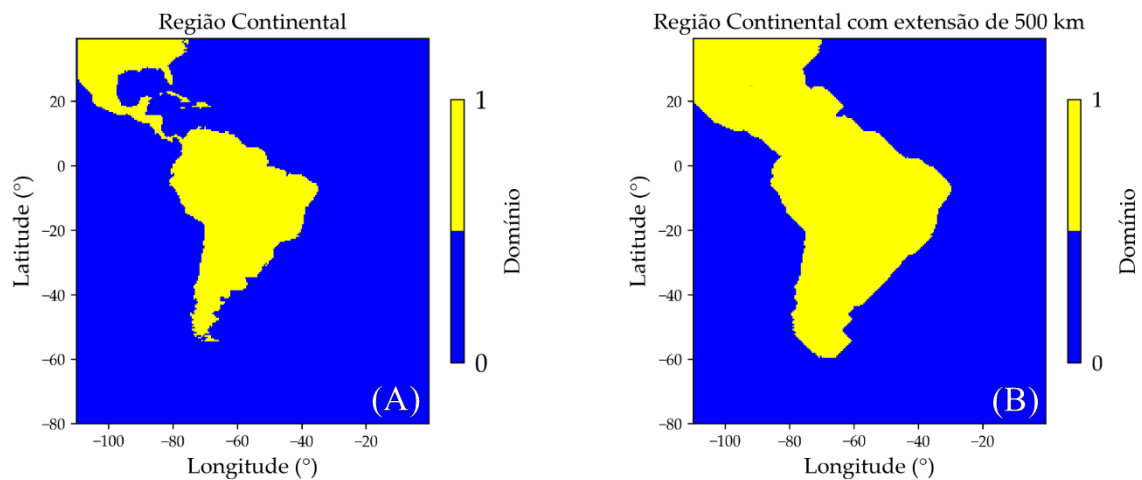
5.1.3 Obtenção de DIXMAPs sobre a América Latina

Após o cálculo do índice DIX para todas as estações disponíveis, são geradas matrizes de observações interpoladas sobre uma determinada região, denominadas DIXMAPs. Essa abordagem simplifica a análise da variabilidade espaço-temporal das perturbações ionosféricas e é essencial para as etapas seguintes da metodologia deste trabalho, tendo como intuito analisar as características morfológicas das EPBs. Neste trabalho, utilizou-se a técnica descrita em [Takahashi et al. \(2016\)](#) para interpolar os dados de DIX obtidos para cada uma das estações GNSS disponíveis, assumindo-se uma escala espacial de $0,5^\circ$. Adicionalmente, cada matriz interpolada possui 10 minutos de dados de DIX acumulados, de modo a preencher lacunas de observações e evitar falhas nos dados. Assim, os DIXMAPs foram obtidos seguindo a metodologia apresentada por [Barbosa-Neto \(2020\)](#).

No entanto, após a obtenção dos DIXMAPs, procedeu-se ao recorte das matrizes interpoladas com o objetivo de definir o domínio do índice e atenuar efeitos de borda, os quais são comuns em técnicas de interpolação. Esse novo procedimento é feito por meio da determinação de uma matriz binária, na qual as células determinadas com o valor 1 indicam a área de interesse do índice, enquanto as células com zero representam os valores de fundo (*background*) e são excluídas.

Na Figura 5.8, apresenta-se a metodologia de determinação do domínio do índice DIX. No painel esquerdo (A), é exibida a região da América Latina, onde a região continental (domínio 1) é destacada em amarelo, enquanto os oceanos (domínio zero) estão destacados em azul. Após a criação da matriz binária, é realizada uma extensão de 500 km na direção radial a partir da área de interesse (painel direito, B). Esse procedimento é realizado com o intuito de definir o domínio do índice como a região continental estendida além das suas bordas, porém sem superestimar a extrapolação realizada por meio da metodologia de interpolação.

Figura 5.8 – Metodologia para determinação do domínio do índice DIX. Painel esquerdo (A): mapa da matriz de recorte. Painel direito (B): mapa da matriz de recorte com extensão de 500 km.



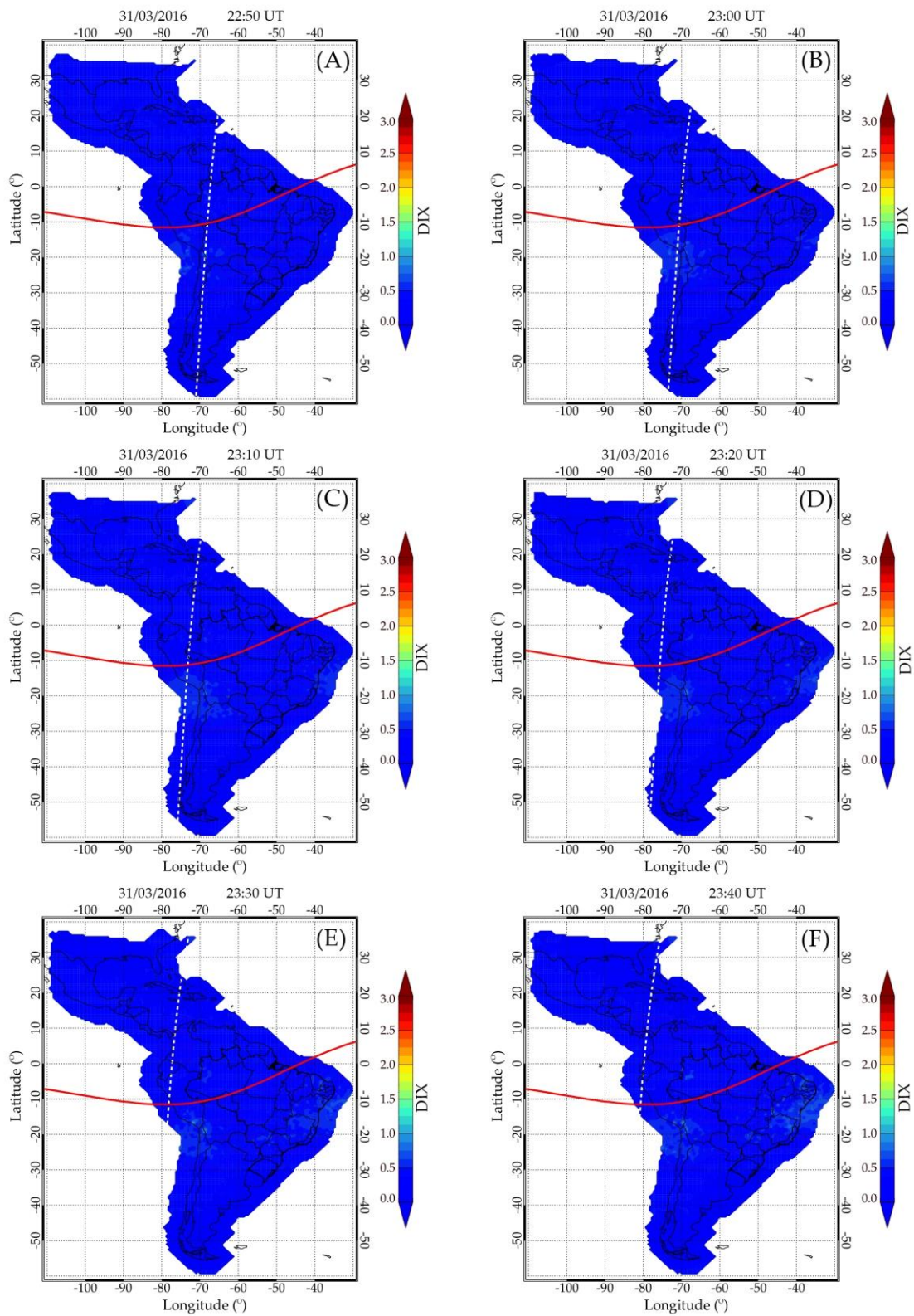
Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.9 ilustra exemplos de DIXMAPs sobre a América Latina em uma noite sem a ocorrência de EPBs. Os mapas foram obtidos para o dia 31/03/2016, no período de 22:50 UT (A) até 23:40 UT (F). A linha vermelha representa as coordenadas do equador

magnético. Ao se observar os mapas, nota-se que toda a região do domínio do índice encontra-se dentro da escala 1, classificada como ‘ionosfera calma’.

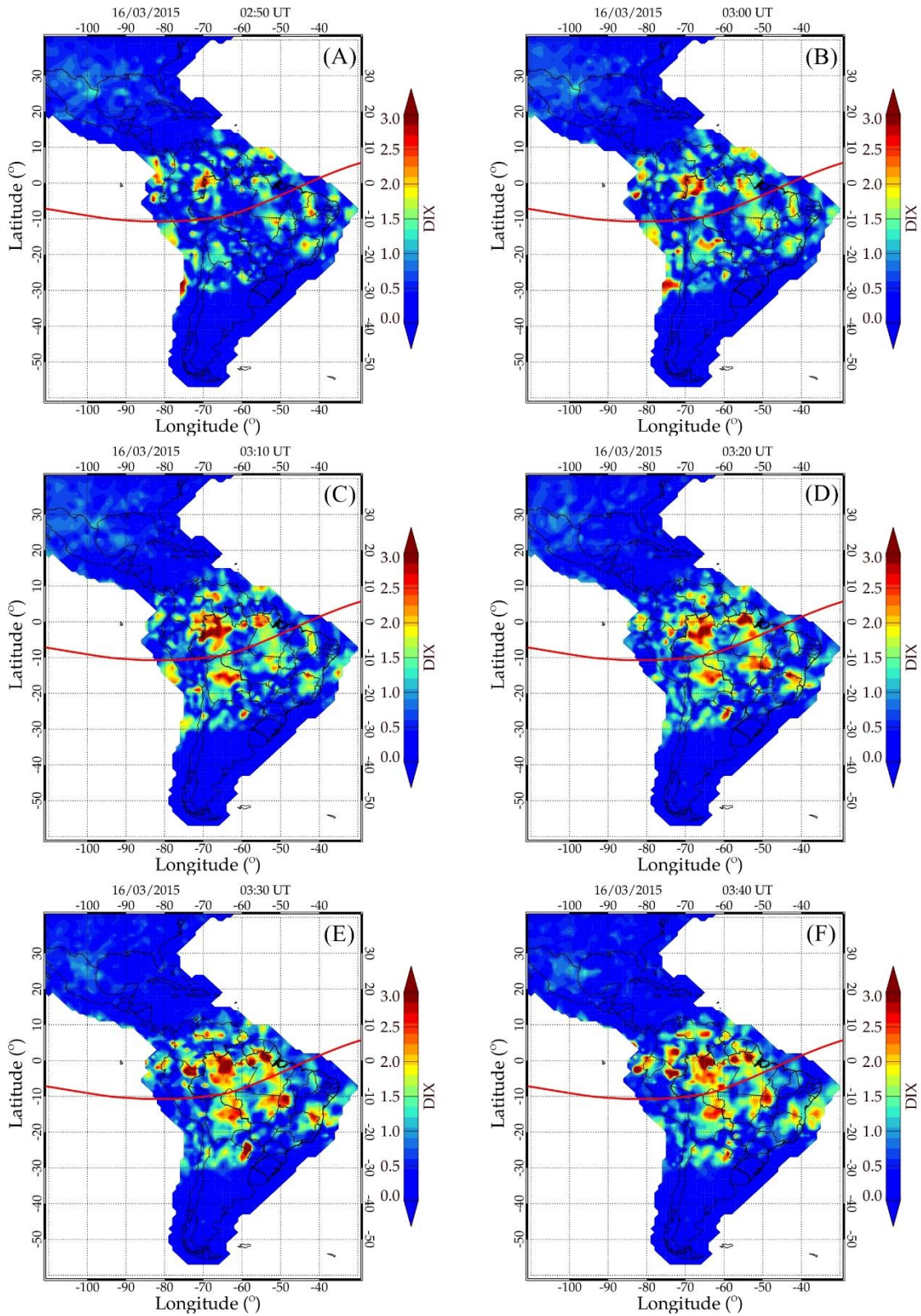
Por outro lado, na Figura 5.10, apresentam-se exemplos de DIXMAPs sobre a América Latina com a ocorrência de EPBs. Os mapas foram obtidos para 16/03/2016, no período de 02:50 UT (A) até 03:40 UT (F). Nos mapas, é possível identificar regiões de perturbação ionosférica em torno do equador magnético, as quais estão relacionadas à ocorrência de EPBs. Adicionalmente, nota-se que essas perturbações atingem o nível 3 na escala do DIX e têm maior concentração na faixa latitudinal entre 10°N e -30°S, aproximadamente.

Figura 5.9 – Sequência de DIXMAPs obtidos para o dia 31/03/2016, no período de 22:50 UT (A) a 23:40 UT (F). A linha em vermelho representa as coordenadas do equador magnético em março de 2016.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.10 – Sequência de DIXMAPs obtidos para o dia 16/03/2015, no período de 02:50 UT (A) a 03:40 UT (F). A linha em vermelho representa as coordenadas do equador magnético em março de 2015.



Fonte: Produção do autor.

5.2 Técnicas de análise de perturbações ionosféricas associadas a EPBs

5.2.1 Keogramas meridionais

O keograma é uma ferramenta gráfica amplamente utilizada com o intuito de simplificar a análise da variação temporal de dados geofísicos, dentre eles imagens de aeroluminescência e mapas ionosféricos (EATHER; MENDE, 1980; BARROS et al., 2018; TAKAHASHI et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2020; VARGAS et al., 2020). Dessa forma, a construção do keograma consiste na substituição de uma das dimensões geográficas (latitude ou longitude) pela dimensão temporal, mantendo a dimensão substituída em uma posição fixa em sua escala. No contexto dos mapas ionosféricos, geralmente dois tipos de keogramas são mencionados na literatura científica (KOTULAK et al., 2020; LOMOTEY, 2021; LI et al., 2022):

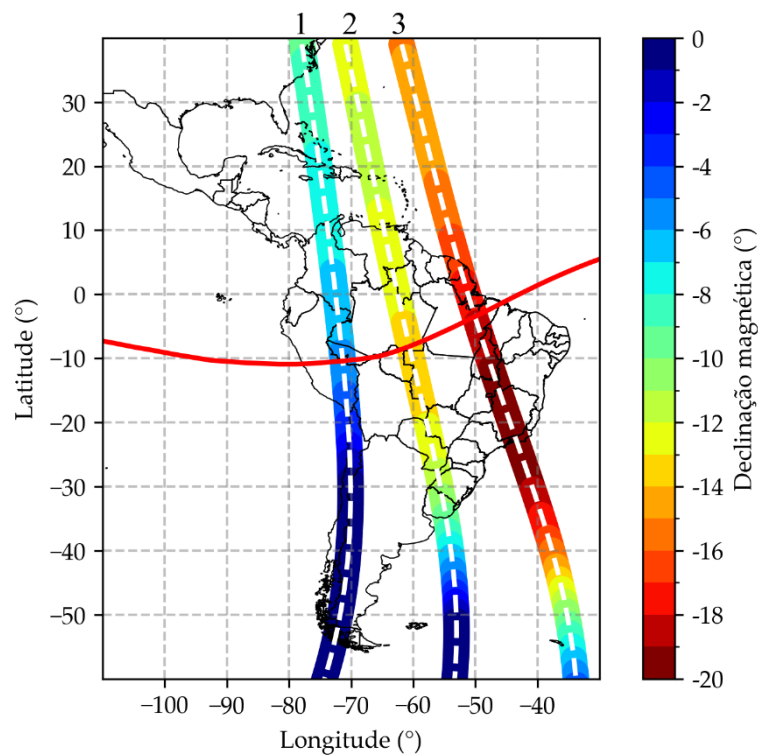
- Keograma meridional: a dimensão fixa é a longitude, com a latitude no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal;
- Keograma zonal: a dimensão fixa é a latitude, com a longitude no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal;

No presente trabalho, foram obtidos keogramas meridionais dos DIXMAPs com a finalidade de analisar a variabilidade latitudinal e temporal das perturbações ionosféricas associadas a EPBs sobre a América Latina. Posteriormente, os keogramas foram utilizados para quantificar os parâmetros morfológicos das perturbações por meio das técnicas metodológicas apresentadas na Seção 5.2.2.

Considerando que as EPBs são irregularidades ionosféricas que se desenvolvem ao longo das linhas de campo geomagnético, os keogramas meridionais foram desenvolvidos considerando as coordenadas de meridianos magnéticos. Para isso, procedeu-se à subdivisão do domínio do índice DIX em três regiões meridionais: oeste, central e leste, de modo a compreender a variabilidade das EPBs com os setores longitudinais e sua dependência com o ângulo de declinação magnética. Essa subdivisão foi realizada por meio do cálculo dos parâmetros magnéticos no domínio do índice, utilizando o modelo de campo geomagnético internacional de referência, na versão 13 (IGRF-13, do inglês *International Geomagnetic Reference Field*).

Na Figura 5.11, apresenta-se um exemplo da localização dos meridianos oeste (1), central (2) e leste (3), em 15/01/2015. A linha vermelha representa as coordenadas geográficas do equador magnético na mesma data. Os símbolos coloridos representam a declinação magnética dos pontos dos meridianos. Observa-se que o meridiano oeste apresenta valores baixos, o meridiano central apresenta valores intermediários e o meridiano leste apresenta valores altos de declinação magnética, considerando o domínio do índice DIX.

Figura 5.11 – Coordenadas geográficas dos meridianos oeste (1), central (2) e leste (3) em 15/01/2015. A linha vermelha representa as coordenadas geográficas do equador magnético. Os símbolos coloridos representam os valores de declinação magnética em cada um dos pontos dos meridianos.



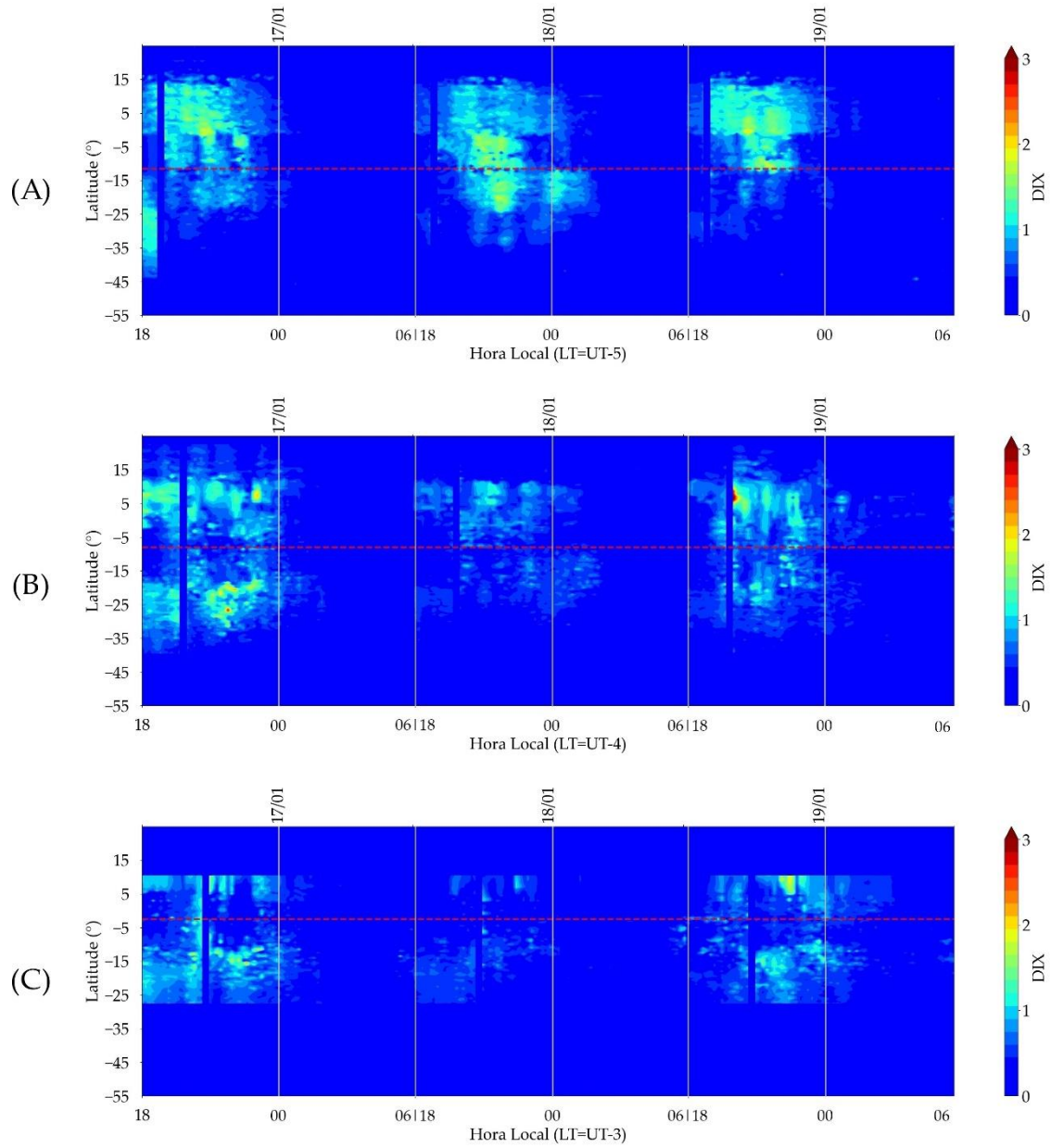
Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.12, são apresentados exemplos de keogramas meridionais obtidos para os meridianos oeste (A), central (B) e leste (C) durante o período de 17 a 19 de janeiro de 2015. As linhas vermelhas tracejadas representam a latitude do equador magnético em cada meridiano. Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho consideram-se apenas períodos geomagneticamente calmos. Dado que o índice DIX é sensível a fenômenos de diversas escalas temporais e diferentes origens, buscou-se a melhor

maneira de concentrar as análises nas perturbações associadas a EPBs, evitando incluir as perturbações de outras origens (e.g. variabilidade diurna da EIA). Nesse sentido, os keogramas foram construídos utilizando dados obtidos durante o período noturno. Portanto, os keogramas são apresentados em hora local (LT), calculada com base na longitude dos meridianos, variando de 18:00 LT a 06:00 LT.

Com base nas informações apresentadas na Figura 5.12, nota-se o surgimento de perturbações no período noturno, representadas nos keogramas como flutuações na escala 1-2 do índice DIX. Essas perturbações são evidentes em todos os meridianos, oeste (A), central (B) e leste (C). No entanto, é importante ressaltar que o domínio do índice impõe certa limitação ao meridiano leste, uma vez que as bordas das perturbações podem ultrapassar a escala latitudinal do continente, região que está além do domínio do DIX, conforme observado no keograma meridional (painel 'C'). Por outro lado, observa-se que nos demais meridianos é possível visualizar claramente as bordas das perturbações (painéis 'A' e 'B'), bem como seus períodos de ocorrência. Além disso, notam-se assimetrias inter-hemisféricas na intensidade das perturbações, conforme visto no período entre 18:00 LT e 00:00 LT do dia 18/01 no keograma do meridiano oeste (painel 'A'). Portanto, ressalta-se que a técnica da visualização de dados utilizando keogramas de DIX obtidos de meridianos magnéticos permite analisar diversas características físicas e morfológicas das perturbações ionosféricas associadas a EPBs, tais como intensidades, assimetrias inter-hemisféricas, períodos de ocorrência e extensões latitudinais.

Figura 5.12 – Keogramas de DIX dos meridianos oeste (A), central (B) e leste (C), no período de 17 a 19 de janeiro de 2015. As linhas vermelhas tracejadas representam as latitudes do equador magnético em cada meridiano. Cada quadrante representa o período noturno de cada dia (18:00 – 06:00), em hora local.



Fonte: Produção do autor.

5.2.2 Sistema automático de detecção e parametrização de perturbações ionosféricas

Com o objetivo de facilitar o processamento dos dados utilizado neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia para a identificação e parametrização automática de perturbações ionosféricas associadas a EPBs em períodos geomagneticamente calmos. O sistema consiste na detecção das perturbações ionosféricas por meio do índice DIX, seguida da análise de seus parâmetros morfológicos. Para esse propósito, os keogramas meridionais do DIX são utilizados de forma individual para cada noite. Qualquer inconsistência é analisada por meio da comparação dos resultados com dados de imageadores e ionossondas, caso seja necessário.

A abordagem central desta técnica envolve a binarização dos keogramas meridionais. Isso é feito por meio da conversão dos dados em matrizes binárias, onde o valor 1 representa a presença de perturbações e o valor zero indica a ausência destas. Para isso, é necessário definir um limiar condicional a fim de classificar as células (*pixels*) das matrizes em valores binários. O limiar binário (T) é definido por meio de uma técnica análoga a um filtro passa-alta, onde o valor de corte é calculado por meio da identificação do valor mais frequente dentro da escala de ionosfera calma do índice DIX (0-1). O valor de T é obtido por meio da Equação (5.4), a seguir:

$$T = M_o(DIX), \text{ se } DIX(x, y) \leq 1, \quad (5.4)$$

onde $M_o(DIX)$ representa a moda estatística (o valor mais frequente) do índice DIX dentro da escala de ionosfera calma (entre 0 e 1), obtida para cada *pixel* (x, y) do keograma.

Após a determinação do limiar binário, T , a matriz binária do DIX (*bin*) pode ser obtida por meio da relação apresentada na Equação (5.5):

$$bin(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } DIX(x, y) > T \\ 0, & \text{se } DIX(x, y) \leq T \end{cases} \quad (5.5)$$

Portanto, células do keograma com valor maior do que o limiar binário serão definidas com o valor 1 (perturbações), enquanto células com valor menor ou igual ao limiar binário serão definidas com o valor zero (sem perturbações).

Após a determinação da matriz binária, procede-se à metodologia de detecção das bordas das perturbações, com o objetivo de delimitar os intervalos de ocorrência e sua extensão máxima em latitude. Isso é feito por meio do somatório dos elementos da matriz binária, tanto ao longo da dimensão temporal (eixo 'x') quanto ao longo da dimensão latitudinal (eixo 'y').

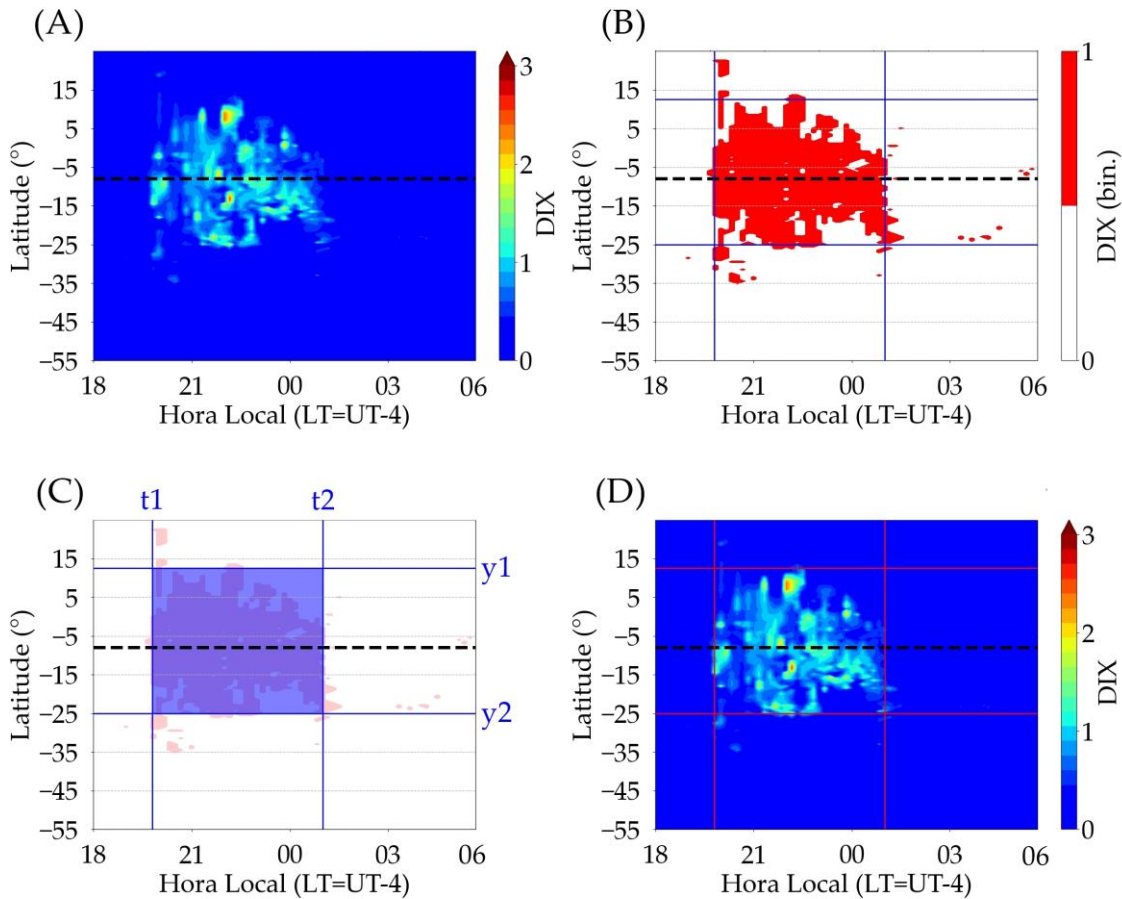
Para determinar a extensão em latitude das perturbações, é realizado o somatório das colunas da matriz binária, linha por linha. Caso o somatório resulte em um valor maior ou igual a seis pontos (onde 1 ponto = 10 min), então a linha é classificada como 'feição perturbada'. Esta etapa se baseia no critério proposto por [Barros et al. \(2018\)](#), que investigam a ocorrência de EPBs por meio da análise de mapas de TEC. Dentre os critérios adotados pelos autores, consideram-se como EPBs as depleções de TEC com duração mínima de 1 hora. Assim, as feições perturbadas com valor no eixo y mais próximo dos limites do domínio do índice são definidas como bordas da perturbação (y_1 e y_2), enquanto as demais são descartadas.

A determinação do intervalo de ocorrência das perturbações é feita por meio do somatório das linhas da matriz binária, coluna por coluna. Caso o somatório resulte em um valor maior ou igual a 9 pontos (onde 1 ponto = $0,5^\circ$), então a coluna é classificada como 'feição perturbada'. Assim como a anterior, esta etapa também é definida conforme o critério proposto por [Barros et al. \(2018\)](#), que classifica como EPBs as regiões com depleções de TEC com extensão maior que 500 km ($\sim 4,49^\circ$). Portanto, as feições perturbadas com valor no eixo x mais próximo dos limites temporais do keograma (18:00 LT e 06:00 LT) são definidas como tempos de início e fim das perturbações (t_1 e t_2), enquanto as demais são descartadas.

Na Figura 5.13, apresenta-se um exemplo da aplicação da metodologia desenvolvida para a detecção de parametrização automática de perturbações ionosféricas associadas a EPBs. No painel 'A', exibe-se o keograma obtido para o meridiano central, no qual observa-se uma região de perturbação ionosférica caracterizada pela intensificação do índice DIX. No painel 'B', apresenta-se o keograma binário do DIX obtido por meio da aplicação da metodologia proposta aos dados apresentados no keograma meridional (painel 'A'), com linhas em azul que demarcam as bordas da perturbação. A região de perturbação (painel 'C') é então definida por meio da delimitação das feições perturbadas, onde y_1 e y_2

representam os limites norte e sul das perturbações, enquanto t_1 e t_2 representam os tempos de início e fim das perturbações, respectivamente. Por fim, o painel ‘D’ ilustra o keograma meridional, demarcado com as bordas da região de perturbação. A linha preta tracejada nos gráficos representa a latitude geográfica do equador magnético no meridiano.

Figura 5.13 – Exemplo de keograma meridional de DIX (painel ‘A’), o qual é utilizado para obter o keograma binário (painel ‘B’) e detectar as bordas das perturbações ionosféricas (linhas em azul). Destacam-se as coordenadas das feições perturbadas utilizadas para calcular o intervalo de ocorrência (t_1 e t_2) e a extensão em latitude (y_1 e y_2) das perturbações ionosféricas associadas a EPBs (painel ‘C’). Adicionalmente, é exibido o keograma meridional demarcado com os limites das perturbações (linhas em vermelho, painel ‘D’). A linha preta tracejada representa a latitude geográfica do equador magnético no meridiano.



Fonte: Produção do autor.

5.2.2.1 Cálculo da extensão latitudinal

Após a identificação das bordas das perturbações ionosféricas, é possível obter sua extensão latitudinal (LAT, intervalo de latitudes geográficas) e seu comprimento estimado (L , dado em km). A extensão latitudinal é obtida pela relação apresentada na Equação (5.6):

$$\text{LAT} = (y_1, y_2) \quad (5.6)$$

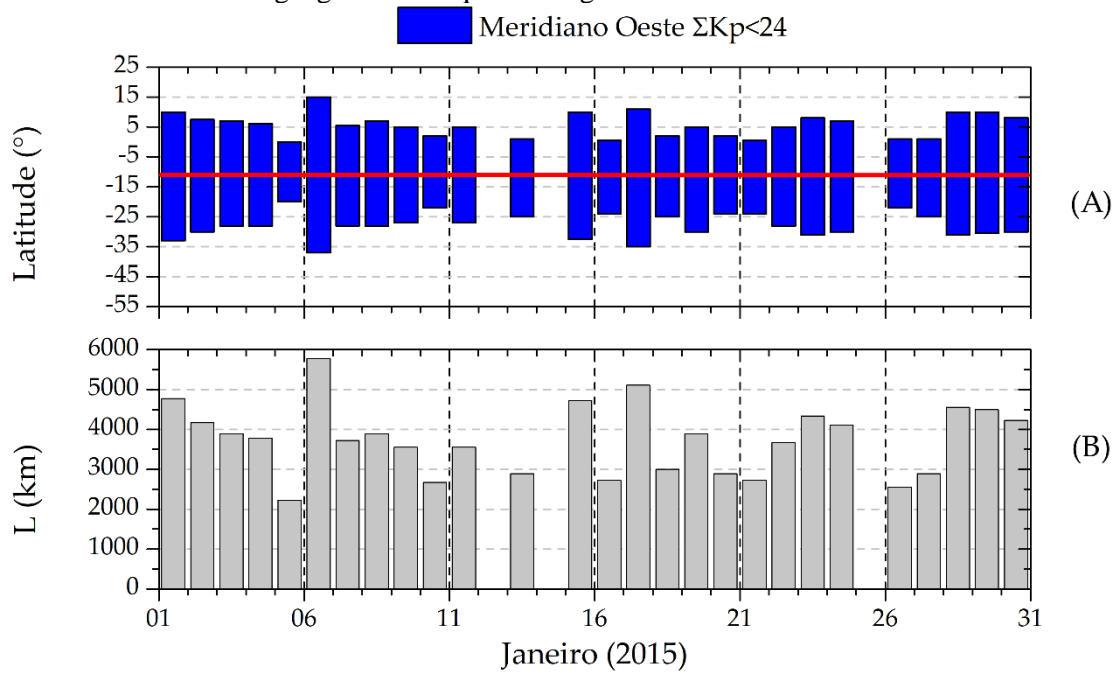
O comprimento das perturbações ionosféricas pode ser estimado utilizando a Equação (5.7):

$$L = d(y_1 - y_2) \quad (5.7)$$

onde $d = 111,19$ km é um fator de conversão entre graus ($^\circ$) e km e representa a fração correspondente da circunferência da Terra.

A Figura 5.14 ilustra um exemplo da variação temporal da extensão em latitude (painel 'A') e comprimento estimado (painel 'B') das perturbações ionosféricas, os quais foram calculados utilizando a metodologia apresentada neste trabalho. Os dados foram obtidos a partir dos keogramas de DIX ao longo do meridiano oeste durante o mês de janeiro de 2015. É importante ressaltar que eventuais lacunas nos gráficos indicam dias com perturbações geomagnéticas ou dias em que não foram identificadas perturbações ionosféricas associadas a EPBs. Em adição, a linha vermelha localizada no gráfico de extensão latitudinal representa a latitude geográfica do equador magnético no meridiano oeste.

Figura 5.14 – Variação temporal da extensão em latitude (painel ‘A’) e comprimento estimado (painel ‘B’) das perturbações ionosféricas associadas a EPBs durante o mês de janeiro de 2015 ao longo do meridiano oeste. A linha vermelha representa a latitude geográfica do equador magnético no meridiano.



Fonte: Produção do autor.

5.2.2.2 Cálculo da assimetria inter-hemisférica

Outro aspecto fundamental no estudo da variabilidade morfológica das perturbações ionosféricas associadas a EPBs diz respeito às suas possíveis simetrias ou assimetrias inter-hemisféricas. Esta característica diz respeito à propensão das perturbações ionosféricas em se manifestarem de maneira mais acentuada em um dos hemisférios magnéticos, e está diretamente associada com os mecanismos eletrodinâmicos que regem a interface ionosfera-termosfera (ver Seção 2.3).

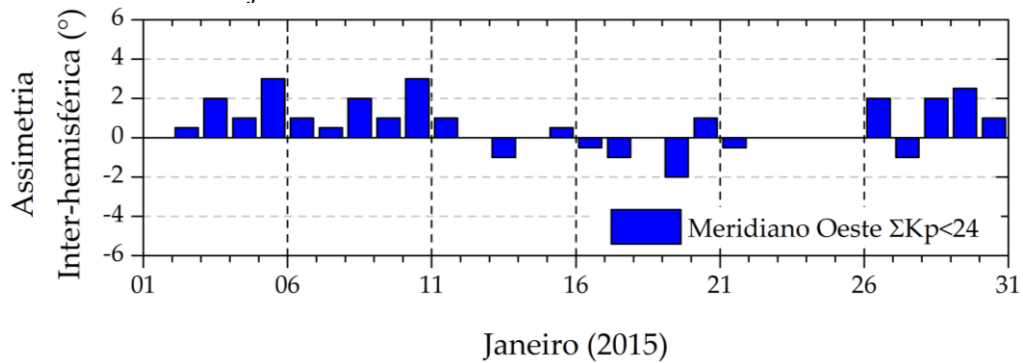
Nesse contexto, este trabalho propõe uma metodologia para a determinação de uma variável capaz de indicar tanto a amplitude e a direção dessas assimetrias, denominada coeficiente de assimetria inter-hemisférica (γ , dado em graus). O cálculo do coeficiente γ é realizado considerando a diferença entre os limites norte e sul das perturbações ionosféricas, tendo o equador magnético como ponto de referência. A relação matemática utilizada para obter o coeficiente γ é apresentada na Equação (5.8) a seguir:

$$\gamma = y_1 - \varphi_{eq} - |y_2 - \varphi_{eq}|, \quad (5.8)$$

onde y_1 e y_2 representam os limites norte e sul das perturbações, respectivamente, e φ_{eq} representa a latitude geográfica do equador magnético no meridiano.

Na Figura 5.15, é apresentado um exemplo de gráfico que ilustra a variabilidade temporal do coeficiente de assimetria inter-hemisférica, obtido ao longo do meridiano oeste durante todo o mês de janeiro de 2015. É importante enfatizar que o coeficiente γ fornece informações sobre a amplitude da assimetria, bem como sua direção. Por exemplo, ao analisar o gráfico, pode-se observar que no período de 2 a 12 de janeiro de 2015, as perturbações ionosféricas ao longo do meridiano oeste se estenderam de forma mais acentuada no hemisfério norte magnético. Além disso, nota-se que a assimetria máxima nesse período atingiu 3 graus (~333 km) nos dias 5 e 10. Posteriormente, observa-se uma inversão na direção da assimetria, uma vez que o período entre 13 e 21 de janeiro exibe predominantemente um coeficiente γ negativo. Finalmente, as assimetrias voltam a ser positivas, com uma maior extensão das perturbações ionosféricas no hemisfério norte magnético a partir do dia 26 de janeiro.

Figura 5.15 – Variação temporal do coeficiente de assimetria inter-hemisférica no meridiano oeste em janeiro de 2015.



Fonte: Produção do autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISE DAS PERTURBAÇÕES IONOSFÉRICAS ASSOCIADAS A EPBS NOS CICLOS SOLARES 24 E 25

O ambiente ionosférico sofre diversas alterações durante a ocorrência de EPBs. Assim, estudar a variabilidade desses fenômenos é de grande importância para compreender as relações que regem a interação entre os diversos mecanismos físico-químicos que controlam a variabilidade da ionosfera terrestre e seus possíveis efeitos sobre as atividades antrópicas (e.g. sistemas de navegação) (JAKOWSKI et al., 2012b).

Um dos principais efeitos das EPBs é a redução na densidade do plasma ionosférico na sua região de perturbação, tendo como referência a densidade de áreas adjacentes. Alguns estudos sugerem que a magnitude dessa depleção do plasma pode ser influenciada simultaneamente por diversos fatores, incluindo a altura da Região F e a quantidade de plasma de fundo (do inglês *background plasma*), dentre outros (SINGH et al., 1997; WAN et al., 2018). Dessa forma, torna-se necessário uma melhor compreensão da variabilidade sazonal e da influência da atividade solar sobre esse aspecto das EPBs.

Outra característica relevante diz respeito à extensão latitudinal máxima alcançada pelas EPBs durante seu desenvolvimento, abrangendo ambos os hemisférios magnéticos. Pimenta et al. (2003) afirmam que a extensão norte-sul das EPBs está diretamente relacionada à altura máxima que elas atingem no equador magnético. Assim, a variabilidade dessa altura exerce influência direta sobre a taxa de crescimento vertical das EPBs, sendo controlada principalmente pela intensidade da deriva vertical da Região F, conforme discutido em estudos encontrados na literatura recente (ABADI et al., 2015; BARROS et al., 2018). Nesse contexto, destaca-se o aspecto particular da América do Sul, caracterizado por uma notável variação longitudinal no ângulo da declinação magnética. Na costa leste, a declinação magnética atinge aproximadamente -21° O no nordeste do Brasil, enquanto na costa oeste atinge 4° L sobre o Peru. Adicionalmente, deve-se considerar a localização do equador magnético, o qual cruza o equador geográfico sobre a costa leste e se estende até aproximadamente -12° S sobre Jicamarca, no Peru. Essas diferenças no setor sul-americano podem influenciar de forma significativa a variação sazonal das características morfológicas das EPBs, devido às variações nos ângulos de declinação e às assimetrias inter-hemisféricas resultantes da variabilidade dos ventos termosféricos e sua relação com a posição geográfica.

Os aspectos supracitados, dentre outros, são exemplos de características físicas e morfológicas das EPBs que podem ser diretamente influenciadas por mecanismos controlados principalmente pela intensidade da atividade solar. Diante disto, neste capítulo são apresentados resultados sobre a variabilidade das principais características de EPBs durante diferentes níveis de atividade solar. Neste sentido, são apresentados resultados de análises das perturbações ionosféricas associadas a EPBs no período entre 01/01/2015 e 30/04/2023, correspondendo ao intervalo entre a fase pós-pico do ciclo solar 24 (junho de 2014) e a fase pré-pico do ciclo solar 25 (previsto para julho de 2024) (NOAA, 2023). Foram analisados dados do índice DIX obtidos em períodos geomagneticamente calmos, com ênfase nos meses de setembro a maio de cada ano, uma vez que esses meses apresentam uma elevada incidência de EPBs sobre a região da América do Sul (ABDU, 1993; BARROS, 2017; AGYEI-YEBOAH et al., 2019). Finalmente, as análises concentraram-se em eventos ocorridos durante o período noturno, totalizando 1164 noites com a ocorrência de EPBs.

Na Seção 6.1, apresenta-se uma análise da variação da intensidade das EPBs em termos da amplitude das depleções de plasma observadas em pontos conjugados. O foco desta análise está na comparação entre meridianos com diferentes declinações magnéticas sobre a América Latina. Os resultados são discutidos considerando tanto a sazonalidade quanto a atividade solar, o que é realizado por meio de uma análise de causalidade dos aspectos físicos das perturbações ionosféricas observadas. Em seguida, a Seção 6.2 descreve os resultados da análise da influência da atividade solar sobre a extensão latitudinal das EPBs, utilizando uma abordagem que envolve a intercomparação entre setores com diferentes declinações magnéticas. Na Seção 6.3 apresenta-se uma análise da influência da declinação magnética sobre a sazonalidade no desenvolvimento latitudinal das EPBs. A Seção 6.4 apresenta uma análise das assimetrias inter-hemisféricas observadas no desenvolvimento latitudinal das EPBs, considerando possíveis efeitos sazonais associados a ventos termosféricos. Finalmente, na Seção 6.5 apresentam-se resultados de simulações computacionais que consideram o desenvolvimento latitudinal máximo das EPBs em diferentes condições de atividade solar. Para isso, apresenta-se um modelo empírico derivado diretamente dos resultados deste trabalho, bem como estimativas globais para a extensão latitudinal máxima de EPBs em períodos geomagneticamente

calmos, levando em conta três níveis de atividade solar e diferentes setores de declinação magnética.

6.1 Variabilidade na intensidade de perturbações ionosféricas associadas a EPBs

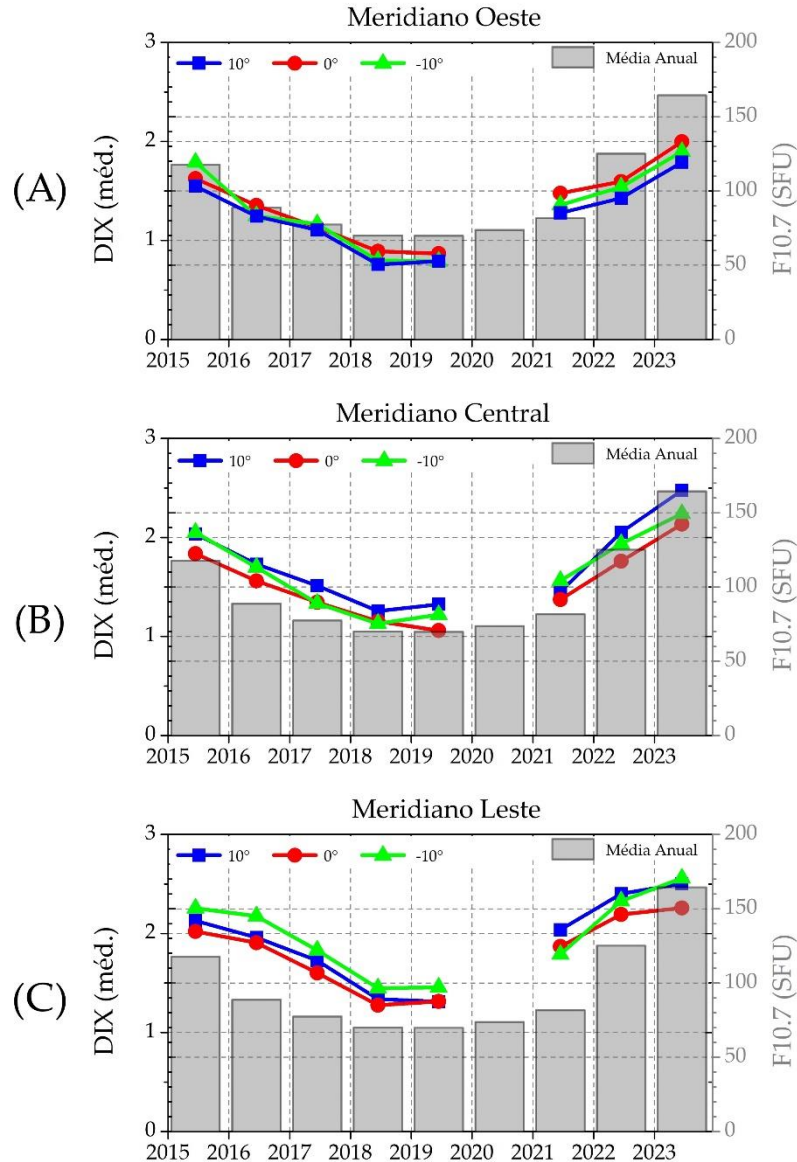
Nesta seção apresenta-se uma análise da variabilidade da intensidade de perturbações ionosféricas associadas a EPBs utilizando o índice DIX. Nesse contexto, o termo "perturbação ionosférica", utilizado neste trabalho, refere-se à variação de plasma associada ao evento de EPB, expressa em termos da resposta observada no índice DIX. Para conduzir esta análise, utilizaram-se dados dos keogramas meridionais do índice DIX, seguindo a metodologia descrita no Capítulo 5 desta tese. Após a identificação dos limites latitudinais, bem como dos tempos de início e término de cada perturbação durante a ocorrência das EPBs, determinou-se o valor máximo do índice DIX em três pontos conjugados ao longo de cada meridiano magnético. Os pontos foram determinados com base em suas inclinações magnéticas, que foram de 10° , 0° e -10° , respectivamente. Esse procedimento foi realizado para todos os dados disponíveis, considerando os períodos geomagneticamente calmos entre 01/01/2015 e 30/04/2023.

Os resultados desta análise são estruturados em duas subseções. Na Subseção 6.1.1, realiza-se um estudo da variabilidade das intensidades das perturbações ionosféricas em função da atividade solar e do setor longitudinal. Na Subseção 6.1.2, realiza-se uma análise mais detalhada, levando em consideração o comportamento sazonal das perturbações e avaliando as particularidades observadas em relação aos parâmetros magnéticos e mecanismos formadores de EPBs.

6.1.1 Variação em função da atividade solar

Na Figura 6.1 apresentam-se gráficos que ilustram as médias anuais dos valores máximos da intensidade do índice DIX durante a ocorrência de EPBs para cada um dos meridianos magnéticos: oeste (A), central (B) e leste (C), no período de 2015 a 2023, com exceção de 2020. Em todos os gráficos, as médias anuais foram calculadas para cada um dos três pontos conjugados, os quais foram categorizados de acordo com suas inclinações magnéticas: 10° (símbolos em azul), 0° (símbolos em vermelho) e -10° (símbolos em verde). Além disso, os gráficos incluem barras em cinza que representam as médias anuais do índice F10.7, expresso em SFU.

Figura 6.1 – Médias anuais dos valores máximos de DIX registrados durante eventos de EPBs em pontos conjugados com inclinação magnética de 0° (linhas vermelhas), 10° (linhas azuis) e -10° (linhas verdes), obtidos nos meridianos oeste (painel ‘A’), central (painel ‘B’) e leste (painel ‘C’), entre 2015 e 2023. As barras na cor cinza representam as médias anuais do índice F10.7 durante o mesmo período.



Fonte: Produção do autor.

Com base nos resultados apresentados na Figura 6.1, observa-se que todas as curvas médias da intensidade máxima do DIX durante as EPBs seguem uma tendência semelhante à variação da atividade solar ao longo da evolução dos ciclos solares 24 e 25. Isso fica evidente ao comparar as curvas médias do DIX com as médias anuais do F10.7 no período entre 2015 e 2019, compreendendo a fase descendente e o mínimo de atividade

solar do ciclo solar 24. Durante esse período, observa-se uma diminuição de aproximadamente 40,78% na intensidade média do fluxo solar, enquanto o DIX exibe uma diminuição de cerca de 50,46% no meridiano oeste, 39,21% no meridiano central e 36,29% no meridiano leste. Durante a fase ascendente do ciclo solar 25, entre 2019 e 2023, observa-se um aumento de aproximadamente 57,60% na intensidade média do fluxo solar. O DIX, por sua vez, mostra um aumento de cerca de 56,92% no meridiano oeste, 47,43% no meridiano central e 44,18% no meridiano leste.

Os dados revelam uma notável variabilidade na taxa de intensificação e enfraquecimento da amplitude de depleção das EPBs em resposta às mudanças no fluxo solar ao longo dos meridianos magnéticos na América do Sul. Nota-se que a variação da intensidade das EPBs em função do fluxo solar diminui da costa oeste em direção ao meridiano central e, posteriormente, ao meridiano leste. Quando o fluxo solar aumenta (diminui), as EPBs demonstram uma tendência diferente em cada uma dessas regiões, destacando a influência significativa da localização geográfica na taxa de intensificação (enfraquecimento) das EPBs em resposta às variações no fluxo solar.

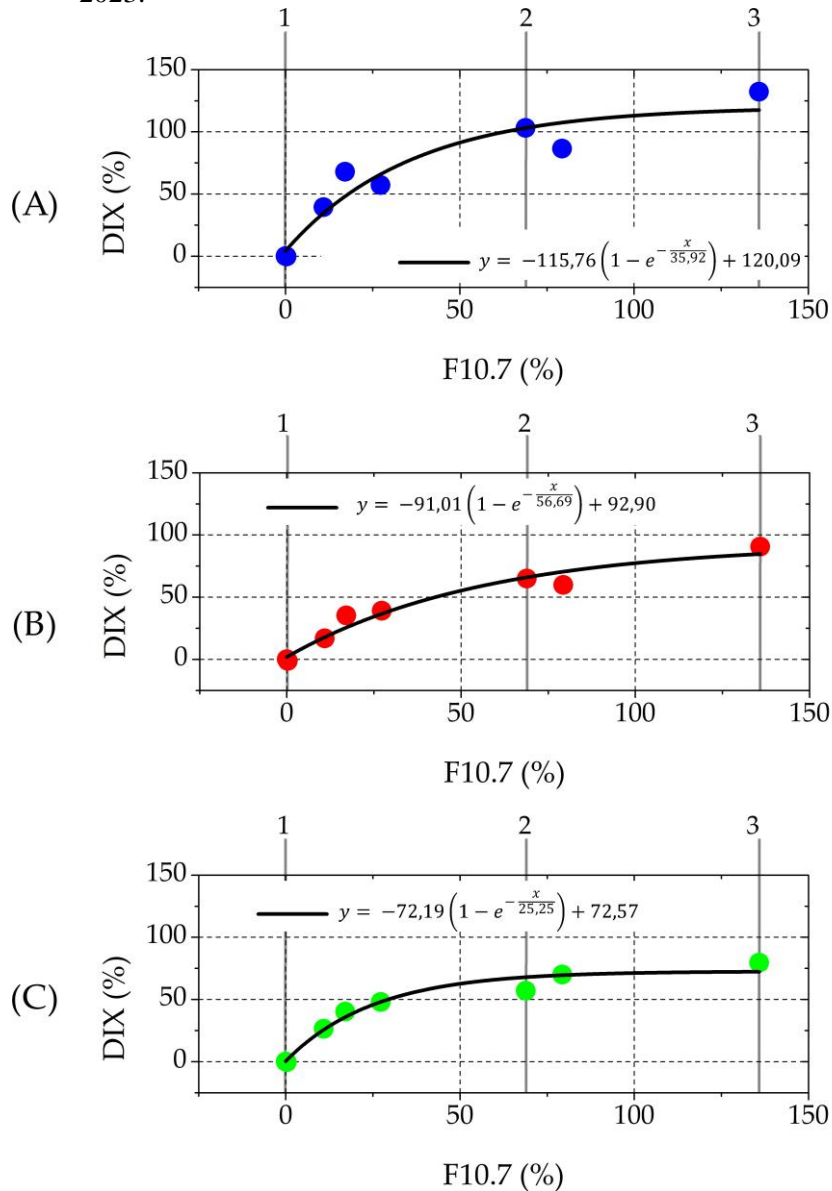
Outro ponto interessante é que, ao comparar os gráficos A, B e C, observa-se que as amplitudes das médias anuais do DIX tendem a ser menores no meridiano oeste, intermediárias no meridiano central e maiores no meridiano leste. Essa variação longitudinal está relacionada à variação do TEC entre esses setores, o qual apresenta valores mais elevados na costa leste em comparação com a costa oeste da América do Sul (NOGUEIRA et al., 2013). Adicionalmente, pode-se associar essas diferenças com a intensidade da velocidade de deriva vertical do plasma no horário do PRE, a qual é maior na costa leste do que na costa oeste da América do Sul (BATISTA et al., 1986). Nesse sentido, ressalta-se que tanto a densidade do plasma quanto a intensidade do pico pré-reversão da deriva vertical apresentam uma forte dependência em relação ao fluxo solar (LIU et al., 2009; FEJER et al., 2008).

Mediante os resultados apresentados na Figura 6.1, estima-se que a declinação magnética desempenhe um papel relevante na diferença longitudinal das amplitudes de depleção das EPBs. Essa afirmação é sustentada pelo estudo de Batista et al. (1986), no qual os autores observaram que a variação longitudinal da declinação magnética exerce uma influência direta sobre a velocidade da deriva vertical. Nesse sentido, a velocidade do PRE tende a

aumentar com a declinação magnética e apresentar variações sazonais em seus picos de intensidade (TSUNODA, 1985). Ressalta-se, também, que Abdu et al. (1981) observaram um comportamento semelhante na ocorrência de EPBs, destacando sua dependência em relação ao ângulo de declinação magnética. Em suma, observa-se que a amplitude das depleções de plasma associadas a EPBs é proporcional a intensidade da energia solar inserida no sistema ionosfera-termosfera, a qual varia conforme a ascensão e descida do ciclo solar ao longo de um período de ~11 anos (GNEVYSHEV, 1967).

Na Figura 6.2 busca-se compreender o grau de dependência da amplitude de depleção das EPBs com o fluxo solar. Para isso, são apresentados gráficos de dispersão que ilustram a relação entre as taxas de variação percentual (%) das médias anuais do índice DIX durante EPBs e o índice F10.7 para os meridianos oeste (A), central (B) e leste (C), no período entre 2015 e 2019. A taxa de variação foi calculada com base nos dados apresentados na Figura 6.2, tendo os valores de 2019 (mínimo solar) como referência. As linhas verticais indicam etapas específicas dos ciclos solares, onde '1' representa o mínimo de atividade solar em 2019, '2' representa a fase pós-pico do ciclo solar 24 em 2015 e '3' representa a fase pré-pico do ciclo solar 25 em 2023. As linhas sólidas em preto representam os ajustes das funções exponenciais calculadas para cada meridiano magnético.

Figura 6.2 – Gráficos de dispersão que ilustram a relação entre as taxas de variação percentual das médias anuais do F10.7 e do DIX durante EPBs em relação ao mínimo solar ocorrido entre os ciclos solares 24 e 25, para os meridianos oeste (A), central (B) e leste (C). As linhas verticais indicam etapas específicas dos ciclos solares: ‘1’ representa o mínimo de atividade solar em 2019, ‘2’ representa a fase pós-pico do ciclo solar 24 em 2015 e ‘3’ representa a fase pré-pico do ciclo solar 25 em 2023.



Fonte: Produção do autor.

Com base nos resultados apresentados na Figura 6.2, pode-se observar que a intensidade das EPBs tende a aumentar com a atividade solar. No entanto, é importante notar que essa relação não é linear e apresenta uma saturação para valores elevados de fluxo solar. Isso

fica evidente ao examinar os dados dos diferentes meridianos (gráficos 'A', 'B' e 'C'). No meridiano oeste (gráfico 'A'), a variação do índice DIX aumenta ~100% ($DIX = \sim 1,65$) em relação ao valor observado no mínimo solar ($DIX = \sim 0,81$) com uma intensificação de ~69,8% no fluxo solar (cerca de 117 SFU em 2015). Por outro lado, no meridiano central (gráfico 'B'), o aumento do DIX se aproxima de 100% ($DIX = \sim 2,28$) considerando o valor observado no mínimo solar ($DIX = \sim 1,20$) com uma intensificação de ~135% no fluxo solar (cerca de 164 SFU em 2023). Por fim, no meridiano leste (gráfico 'C'), o aumento do DIX não alcança 100% em relação ao valor observado no mínimo solar ($DIX = \sim 1,36$), atingindo uma taxa de variação máxima de 79,52% ($DIX = \sim 2,43$) com um aumento de ~135% no fluxo solar (cerca de 164 SFU em 2023).

Ao observar as funções exponenciais modeladas para os meridianos oeste, central e leste da América do Sul, notam-se respostas diferentes no que diz respeito à variação do DIX em função do fluxo solar. A análise dos coeficientes da função exponencial revela que o meridiano oeste apresenta uma taxa de intensificação das EPBs mais elevada, representada pelo coeficiente de 115,76, o que indica uma resposta mais imediata às variações no fluxo solar. O ponto de saturação é atingido com um acréscimo de 120,09% na intensidade do F10.7 em relação ao valor observado no mínimo solar, denotando a máxima intensidade das EPBs durante o período. Ressalta-se que a partir desse ponto a taxa de aumento da intensidade das EPBs diminui consideravelmente. Em contraste, o meridiano leste exibe uma taxa de intensificação menor, com um coeficiente de 72,19, indicando um crescimento mais gradual. Contudo, as EPBs atingem seu ponto de saturação com maior facilidade sobre o meridiano leste. Este ocorre mediante um acréscimo de 72,57% na intensidade do F10.7 em relação ao valor observado no mínimo solar. Adicionalmente, o meridiano central apresenta uma taxa de intensificação de 91,01, com um ponto de inflexão em 56,09. Neste caso, a saturação ocorre em face de um acréscimo de 92,90% no F10.7 observado durante o mínimo solar.

A análise dos coeficientes da função exponencial de cada um dos meridianos mostra que a variação da amplitude das depleções relacionadas a EPBs tem forte relação com o setor longitudinal. Nesse sentido, os coeficientes fornecem uma análise aprofundada das características particulares de cada região em função da variabilidade do fluxo solar. A análise funcional destaca distintos padrões de resposta das EPBs às variações no fluxo solar nos meridianos da América do Sul. O meridiano oeste, caracterizado por uma

elevada taxa de intensificação inicial, denota uma resposta altamente sensível, alcançando a saturação. O meridiano leste, apesar de apresentar uma taxa inicial inferior, atinge sua saturação de maneira mais rápida, sugerindo uma estabilização antecipada em relação aos demais meridianos. O meridiano central, situado entre esses extremos, exibe um notável equilíbrio, com uma taxa inicial e intensificação de atividade solar para saturação intermediários. Esses aspectos das funções exponenciais proporcionam uma compreensão das características específicas de cada região em relação às EPBs, destacando como diferentes setores meridionais reagem de maneira única às flutuações no fluxo solar.

Diante desses resultados, observa-se, ainda, que o ponto de saturação da intensidade máxima observada nas EPBs durante períodos geomagneticamente calmos tende a aumentar com a declinação magnética. Esse fator pode estar relacionado com a intensidade da velocidade da deriva vertical durante o PRE, a qual, por sua vez, controla a amplitude da depleção de plasma observada durante as EPBs. [Fejer et al. \(1991\)](#) e [Santos et al. \(2013\)](#) observaram uma saturação na intensificação do pico pré-reversão em função do fluxo solar em todo o setor da América do Sul. [Santos et al. \(2013\)](#) observaram uma variação longitudinal na qual o setor com a maior declinação magnética demonstrou uma velocidade de deriva vertical mais alta durante o PRE. Isso implica que no setor com maior declinação é necessário um menor nível de fluxo solar para alcançar o mesmo V_z máximo observado em um setor com menor declinação. Portanto, destaca-se que os resultados apresentados nesta seção estão em consonância com estudos da literatura científica que abordam a variabilidade longitudinal da deriva vertical do plasma e sua relação com a atividade solar.

Em resumo, espera-se que eventos de EPBs sobre regiões com alta declinação magnética apresentem depleções de plasma potencialmente maiores do que sobre regiões de menor declinação magnética, durante períodos geomagneticamente calmos. Contudo, é previsto que haja um limite de saturação do desenvolvimento das EPBs, onde, mesmo com o aumento do fluxo solar, a depleção de plasma não apresentará um aumento significativo.

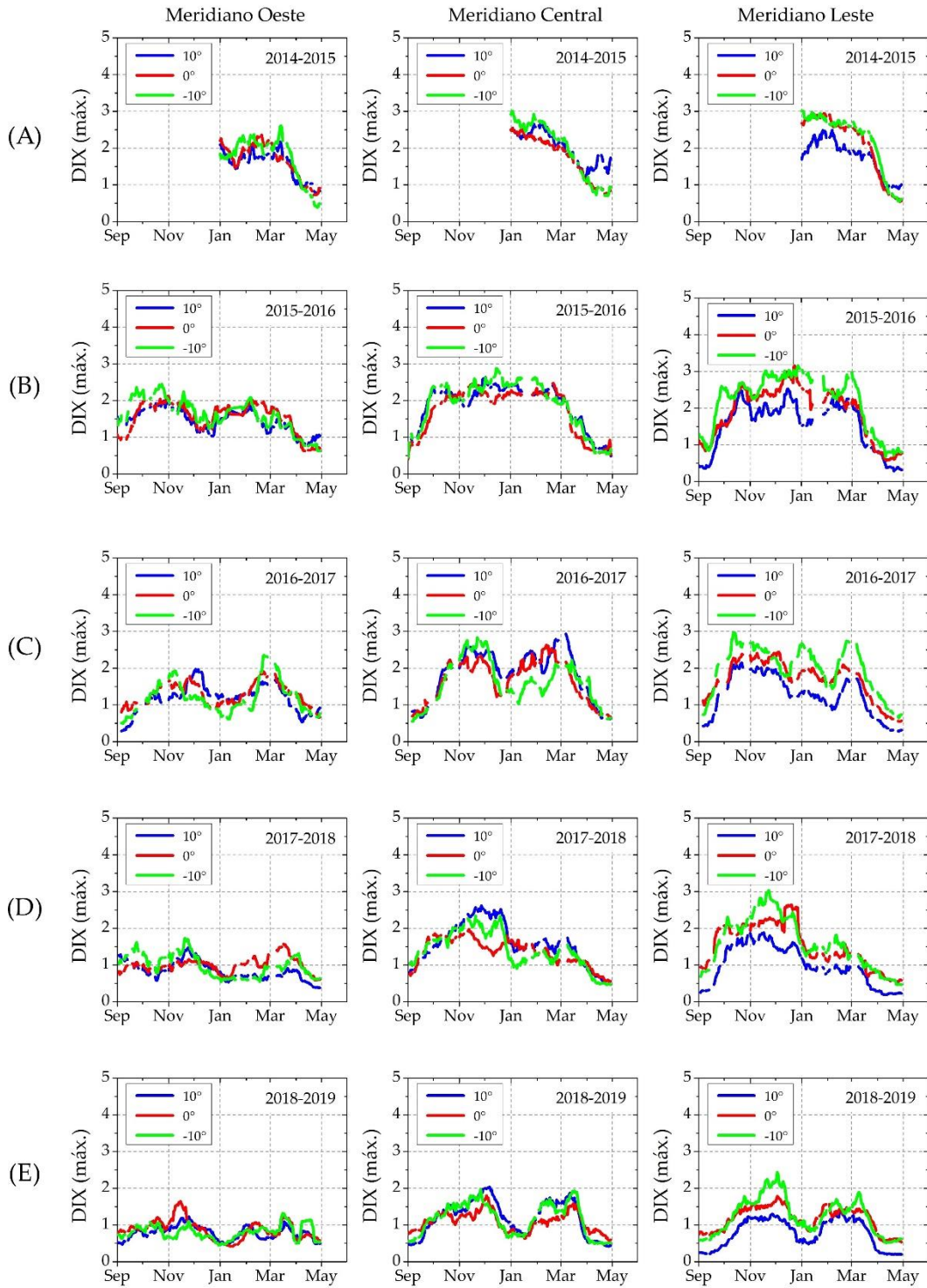
6.1.2 Comportamento sazonal ao longo dos ciclos solares 24 e 25

Na Figura 6.3 apresentam-se gráficos da variação temporal dos valores máximos de DIX registrados durante eventos de EPBs ao longo do período entre 01/01/2015 e 30/04/2019. Cada curva representa um intervalo de valores que compreende uma média móvel de 15

dias dos dados disponíveis nos meses de setembro a maio de 2014-2015 (A), 2015-2016 (B), 2016-2017 (C), 2017-2018 (D) e 2018-2019 (E). Os gráficos apresentados à esquerda correspondem ao meridiano oeste, enquanto os gráficos ao centro e à direita correspondem aos meridianos central e leste, respectivamente. Adicionalmente, os dados foram obtidos especificamente para os pontos conjugados em 10° (linhas em azul), 0° (linhas em vermelho) e -10° (linhas em verde) de inclinação magnética. O período entre 2014 e 2019 é definido neste trabalho como a fase descendente do ciclo solar 24.

Diante dos resultados apresentados na Figura 6.3, observa-se que a intensidade das EPBs apresenta um comportamento sazonal, o qual varia longitudinalmente. Isso pode ser evidenciado ao se observar os gráficos A, B, C, D e E. No meridiano oeste (painel esquerdo), é evidente a presença de dois picos de intensidade nos meses de outubro-novembro e fevereiro-março, separados por uma redução abrupta no período próximo a janeiro. Já nos meridianos central e leste, nota-se um comportamento diferente, com um pico próximo ao mês de dezembro, seguido de uma clara intensificação em março.

Figura 6.3 – Variação temporal dos valores máximos de DIX registrados durante eventos de EPBs em pontos conjugados com inclinação magnética de 0° (linhas em vermelho), 10° (linhas em azul) e -10° (linhas em verde), obtidos nos meridianos oeste (painel esquerdo), central (painel do centro) e leste (painel direito) ao longo dos meses de setembro a maio de 2014-2015 (A), 2015-2016 (B), 2016-2017 (C), 2017-2018 (D) e 2018-2019 (E).



Fonte: Produção do autor.

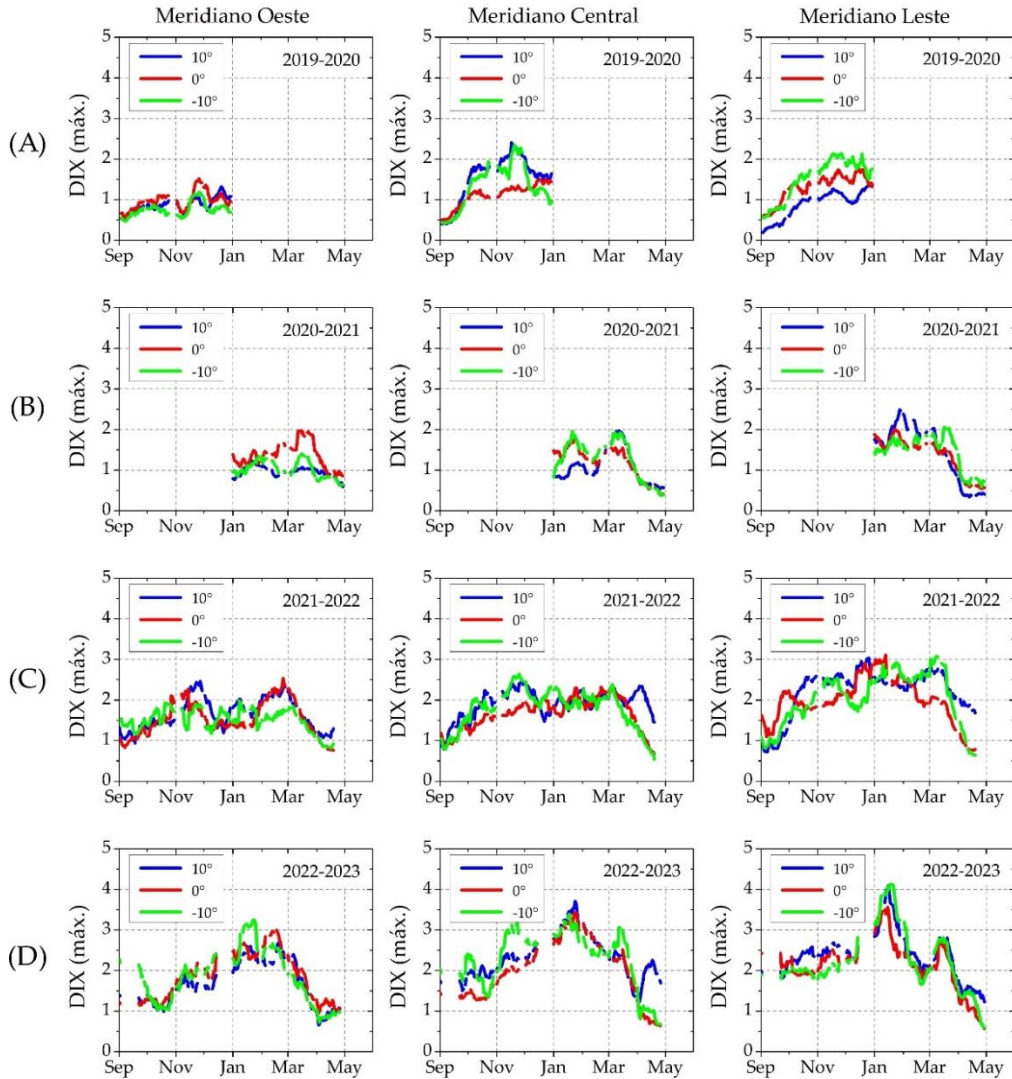
É importante destacar que esses resultados abordam a variabilidade sazonal da intensidade das EPBs, e não a sua taxa de ocorrência. A frequência de ocorrência de EPBs segue um padrão sazonal amplamente conhecido, com maior incidência durante os períodos equinociais, com exceção do setor longitudinal brasileiro, onde a frequência de ocorrência é mais alta no solstício de verão (BURKE et al., 2004; ABDU, 2005). Isso ressalta a relação dessa diferença longitudinal com a variabilidade do PRE e sua dependência em relação ao ângulo de declinação magnética no setor brasileiro.

Dado que a Figura 6.3 aborda a amplitude de depleção das EPBs, é importante ressaltar o papel fundamental desempenhado pela intensidade do PRE em seu desenvolvimento, bem como a influência significativa da variação sazonal do TEC. É relevante observar que quanto maior a densidade do plasma, maior será a magnitude da perturbação ionosférica. Nesse sentido, destaca-se que o TEC segue um comportamento semi-anual, independente do setor longitudinal, com picos ocorrendo nos meses de equinócio (NOGUEIRA et al., 2013).

Uma observação relevante é que ao longo do meridiano oeste, tanto o TEC quanto o PRE atingem seus valores máximos durante os meses dos equinócios, o que leva a perturbações mais intensas no DIX nesses períodos. Por outro lado, no meridiano leste, os maiores valores de TEC são registrados nos meses equinociais, contudo os maiores valores de PRE ocorrem em dezembro e janeiro (BATISTA et al., 1996; FEJER et al., 2008). Isso resulta em uma variação sazonal na intensidade das perturbações associadas às EPBs que é menos perceptível, com picos mais próximos a dezembro, mas também com valores elevados durante os meses dos equinócios.

Na Figura 6.4 são exibidos os mesmos tipos de gráficos mostrados na Figura 6.2, porém para o período entre 01/09/2019 e 30/04/2023, com exceção do ano de 2020 devido à indisponibilidade de dados. Cada curva representa um intervalo de valores que compreende uma média móvel de 15 dias dos dados disponíveis nos meses de setembro a maio de 2019-2020 (A), 2020-2021 (B), 2021-2022 (C) e 2022-2023 (D). Os gráficos apresentados à esquerda correspondem ao meridiano oeste, enquanto os gráficos ao centro e à direita correspondem aos meridianos central e leste, respectivamente. Adicionalmente, o período entre 2019 e 2023 é definido neste trabalho como a fase ascendente do ciclo solar 25.

Figura 6.4 – Variação temporal dos valores máximos de DIX registrados durante eventos de EPBs em pontos conjugados com inclinação magnética de 0° (linhas em vermelho), 10° (linhas em azul) e -10° (linhas em verde), obtidos nos meridianos oeste (painel esquerdo), central (painel do centro) e leste (painel direito) ao longo dos meses de setembro a maio de 2019-2020 (A), 2020-2021 (B), 2021-2022 (C) e 2022-2023 (D).



Fonte: Produção do autor.

Assim como na fase descendente do ciclo solar 24, a fase ascendente do ciclo solar 25 revela uma variabilidade no comportamento sazonal da amplitude das depleções associadas às EPBs, a qual tende a seguir a intensidade do fluxo solar. Um exemplo disso pode ser observado nos gráficos 'A' e 'B' da Figura 6.4 (2019-2020 e 2020-2021), onde surgem dois picos de intensidade em novembro e março no meridiano oeste. No entanto, é notável que o mínimo próximo a janeiro apresenta uma variação positiva em comparação com outros períodos para este meridiano. Por outro lado, nos meridianos

central e leste, esses picos tendem a se deslocar em direção aos meses de verão, como evidenciado nos gráficos da coluna central e direita da Figura 6.3. Ao examinar os gráficos em 'C' (2021-2022), pode-se observar que os dois picos de intensidade das EPBs continuam visíveis no meridiano oeste. No entanto, observa-se que no meridiano central a redução de intensidade observada em janeiro não é tão acentuada quanto no meridiano oeste e nos gráficos do meridiano central obtidos durante o período de mínima atividade solar. Além disso, nota-se uma inversão no comportamento da intensidade máxima das EPBs em janeiro, onde ocorre a presença de um terceiro pico, em contraste com a diminuição dos valores previamente observada. Finalmente, durante o período de 2022 a 2023 (gráficos em 'D'), observa-se um comportamento semelhante de inversão nos valores previamente observados entre os picos de ocorrência em todos os meridianos. Nestes casos, é notável que o terceiro pico apresenta uma amplitude maior do que os demais, conforme observado nos dados de todos os meridianos. Esse comportamento assemelha-se ao observado nos resultados da Figura 6.3, reforçando as discussões apresentadas anteriormente.

6.2 Influência da atividade solar sobre a extensão latitudinal das EPBs

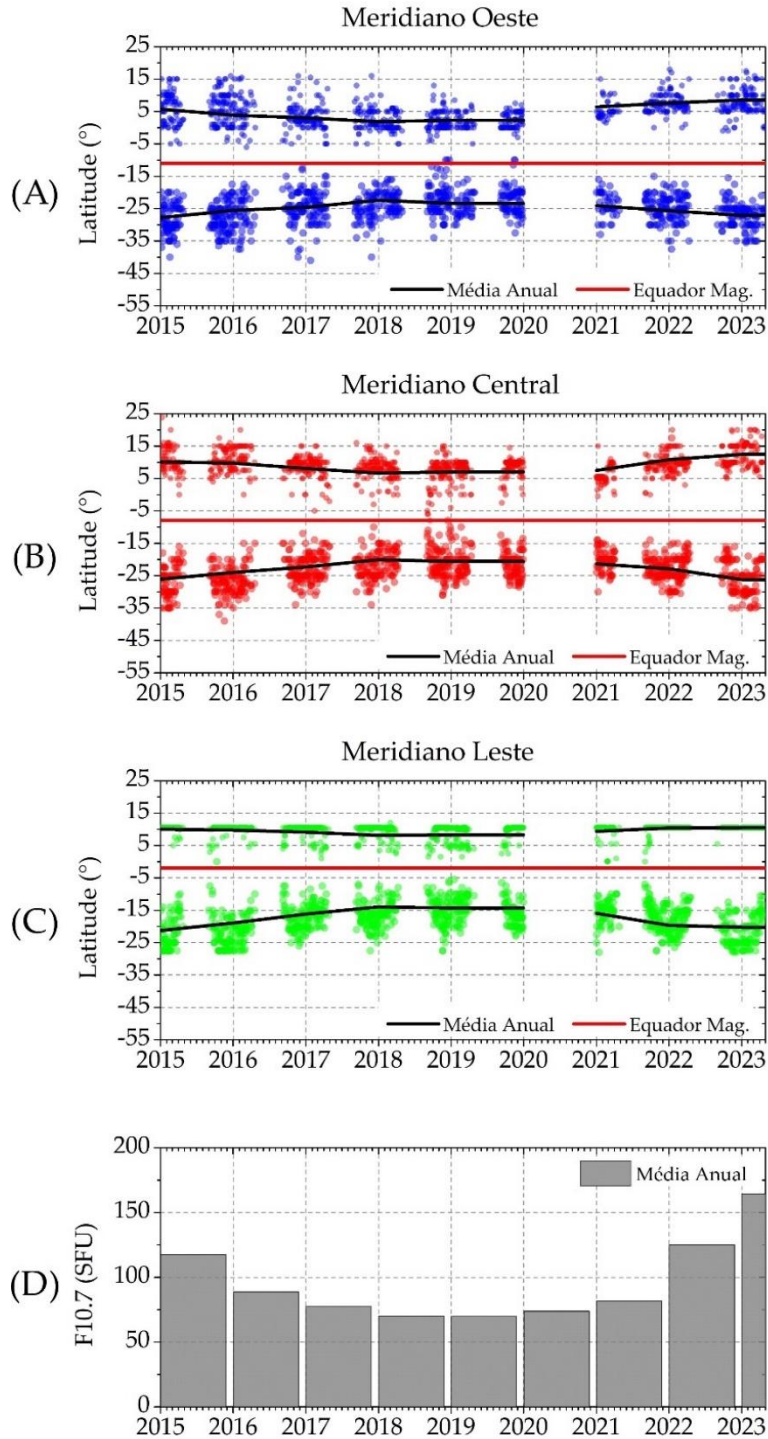
Nesta seção é apresentada uma análise da extensão latitudinal das EPBs em função da variação da atividade solar durante os ciclos 24 e 25. Para isso, utilizaram-se dados dos keogramas meridionais do índice DIX de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 5 deste trabalho. Neste contexto, foram identificados os limites latitudinais das perturbações ionosféricas associadas às EPBs em ambos os hemisférios magnéticos durante os períodos geomagneticamente calmos compreendidos entre 01/01/2015 e 30/04/2023, considerando apenas dados obtidos no período noturno para os meses de setembro a maio de cada ano, com exceção de 2020.

Na Figura 6.5 apresentam-se gráficos da evolução temporal da extensão latitudinal máxima das EPBs no período entre 2015 e 2023, para os meridianos oeste (A), central (B) e leste (C). As linhas em vermelho em cada gráfico representam a latitude geográfica do equador magnético para cada meridiano. Os símbolos acima da linha do equador magnético representam a extensão máxima das EPBs no hemisfério magnético norte, enquanto símbolos abaixo da linha do equador magnético representam a extensão máxima no hemisfério magnético sul. As linhas em preto acompanhando os símbolos representam

as médias anuais das extensões latitudinais máximas em cada hemisfério magnético. Adicionalmente, as barras em cinza representam as médias anuais do F10.7 no período entre 2015 e 2023 (C).

Os resultados apresentados nesta figura mostram que, assim como a intensidade das depleções de plasma, a extensão latitudinal das EPBs também segue a tendência de variação do ciclo solar. Isso pode ser evidenciado nos gráficos A, B e C por meio da sua comparação com a média anual do F10.7 (gráfico D). Ressalta-se que os dados do meridiano leste no hemisfério magnético norte apresentam uma limitação relacionada ao domínio do índice DIX, conforme discutido na Seção 5.2.1, em função da cobertura continental dos dados GNSS. Contudo, ainda assim é possível ver a tendência de variação anual da latitude máxima das EPBs. Em suma, observa-se que as bordas das EPBs tendem a estar mais distantes do equador magnético em períodos de alta atividade solar (2015 e 2023) e mais próximas ao equador magnético em períodos de baixa atividade solar (2019). Esses resultados evidenciam que as EPBs se desenvolvem ao longo de um ciclo de ~11 anos, o qual é controlado pela variabilidade da atividade solar ([GNEVYSHEV, 1967](#)). Neste sentido, as EPBs apresentam menor intensidade e menor extensão latitudinal no período de baixa atividade solar, onde as bordas destas encontram-se mais próximas do equador magnético. Ao longo da fase ascendente do ciclo solar, as bordas das EPBs tendem a se afastar do equador magnético, atingindo uma latitude máxima possível. Em seguida, na fase descendente do ciclo solar, as EPBs passam a se aproximar do equador magnético, atingindo uma latitude mínima.

Figura 6.5 – Variação temporal das extensões latitudinais máximas atingidas pelas perturbações ionosféricas associadas a EPBs nos meridianos oeste (painel A), central (painel B) e leste (painel C) no período entre 01/01/2015 e 30/04/2023. Em todos os gráficos, as linhas em preto representam as médias anuais das extensões máximas, enquanto as linhas vermelhas representam a latitude do equador magnético em cada um dos meridianos. O gráfico de barras na cor cinza (painel 'D') representa as médias anuais do índice F10.7 durante o mesmo período.



Fonte: Produção do autor.

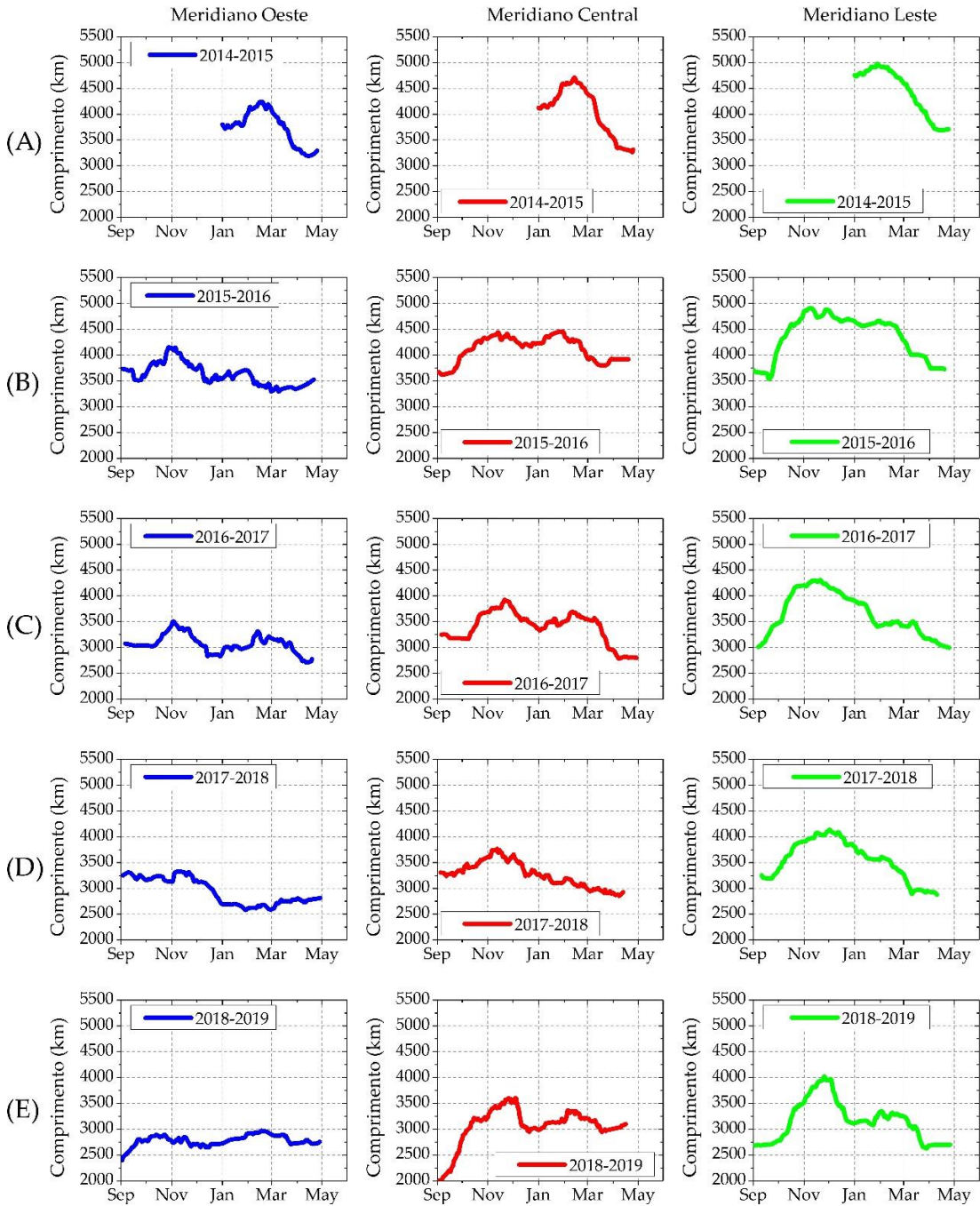
Uma vez que a extensão latitudinal das EPBs está diretamente relacionada à altura máxima que estas atingem no equador magnético (PIMENTA et al., 2003; KELLEY, 2009), pode-se associar os resultados apresentados nesta seção com os mesmos mecanismos responsáveis pela variabilidade na intensidade das EPBs de acordo com a atividade solar, a dependência com a intensidade do PRE e a declinação magnética. Sendo assim, nota-se que a extensão latitudinal das EPBs é proporcional ao fluxo solar, o qual varia conforme os períodos de ascensão e descida da atividade solar. No entanto, ressalta-se que há um ponto de saturação no desenvolvimento das EPBs em função do fluxo solar, o qual foi discutido na Seção 6.1, de modo que é esperado um ponto de saturação na latitude máxima atingida pelas EPBs.

6.3 Variação sazonal e longitudinal do desenvolvimento latitudinal das EPBs

Nesta seção apresentam-se resultados da análise do comportamento sazonal das EPBs em relação ao seu desenvolvimento latitudinal em diferentes setores de longitude. Para isso, foram calculadas médias dos dados de extensão latitudinal (°) e comprimento (km) das perturbações ionosféricas associadas a EPBs para os três meridianos magnéticos, conforme discutido na seção de metodologia deste trabalho.

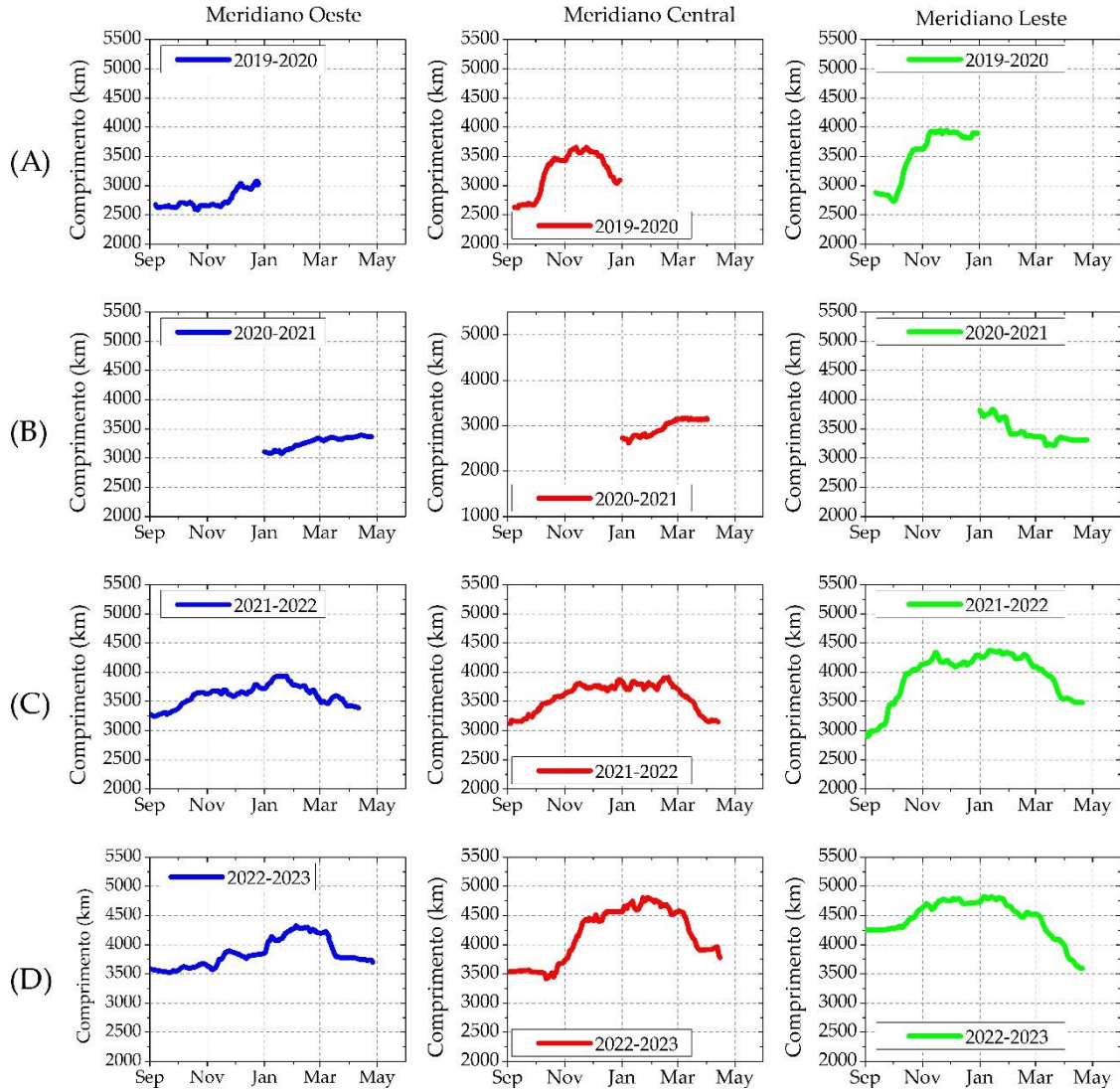
Nas Figuras 6.6 e 6.7 apresentam-se gráficos dos valores de comprimento (km) das perturbações ionosféricas associadas a EPBs ao longo do período entre 01/01/2015 e 30/04/2023. Cada curva representa uma média móvel de 15 dias dos dados disponíveis nos meses de setembro a maio de cada ano. A Figura 6.6 contém dados de 2014-2015 (A), 2015-2016 (B), 2016-2017 (C), 2017-2018 (D) e 2018-2019 (E), representando a fase descendente do ciclo solar 24. A Figura 6.7 contém dados de 2019-2020 (A), 2020-2021 (B), 2021-2022 (C) e 2022-2023 (D), representando a fase ascendente do ciclo solar 25. Os gráficos à esquerda correspondem ao meridiano oeste (linhas em azul), enquanto os gráficos ao centro (linhas em vermelho) e à direita (linhas em verde) correspondem aos meridianos central e leste, respectivamente. Ressalta-se que o cálculo do comprimento das EPBs no meridiano leste foi realizado considerando apenas as bordas no hemisfério magnético sul, de modo a evitar a limitação imposta pelo domínio do índice DIX. Logo, para este meridiano, o comprimento das EPBs foi aproximado multiplicando sua extensão no hemisfério magnético sul por dois, de modo similar à metodologia apresentada em Barros (2017).

Figura 6.6 – Variação temporal das medidas de comprimento (km) das EPBs ao longo dos meses de setembro a maio durante os anos de 2014-2015 (A), 2015-2016 (B), 2016-2017 (C), 2017-2018 (D) e 2018-2019 (E). As medidas foram obtidas nos meridianos oeste (painel esquerdo, linhas em azul), central (painel do centro, linhas em vermelho) e leste (painel do direito, linhas em verde).



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.7 – Variação temporal das medidas de comprimento (km) das perturbações ionosféricas associadas a EPBs ao longo dos meses de setembro a maio durante os anos de 2019-2020 (A), 2020-2021 (B), 2021-2022 (C) e 2022-2023 (D). As medidas foram obtidas nos meridianos oeste (painel esquerdo, linhas em azul), central (painel do centro, linhas em vermelho) e leste (painel direito, linhas em verde).



Fonte: Produção do autor.

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7, pode-se observar que o comportamento sazonal dos comprimentos das EPBs ao longo do ciclo solar varia conforme o setor longitudinal. Na costa oeste da América do Sul, o comprimento das EPBs segue um padrão semi-anual, com picos nos meses de equinócios, enquanto no meridiano leste, esses comprimentos são maiores durante os meses de verão. O meridiano central, por sua vez, mostra um comportamento de transição, com alguns anos registrando

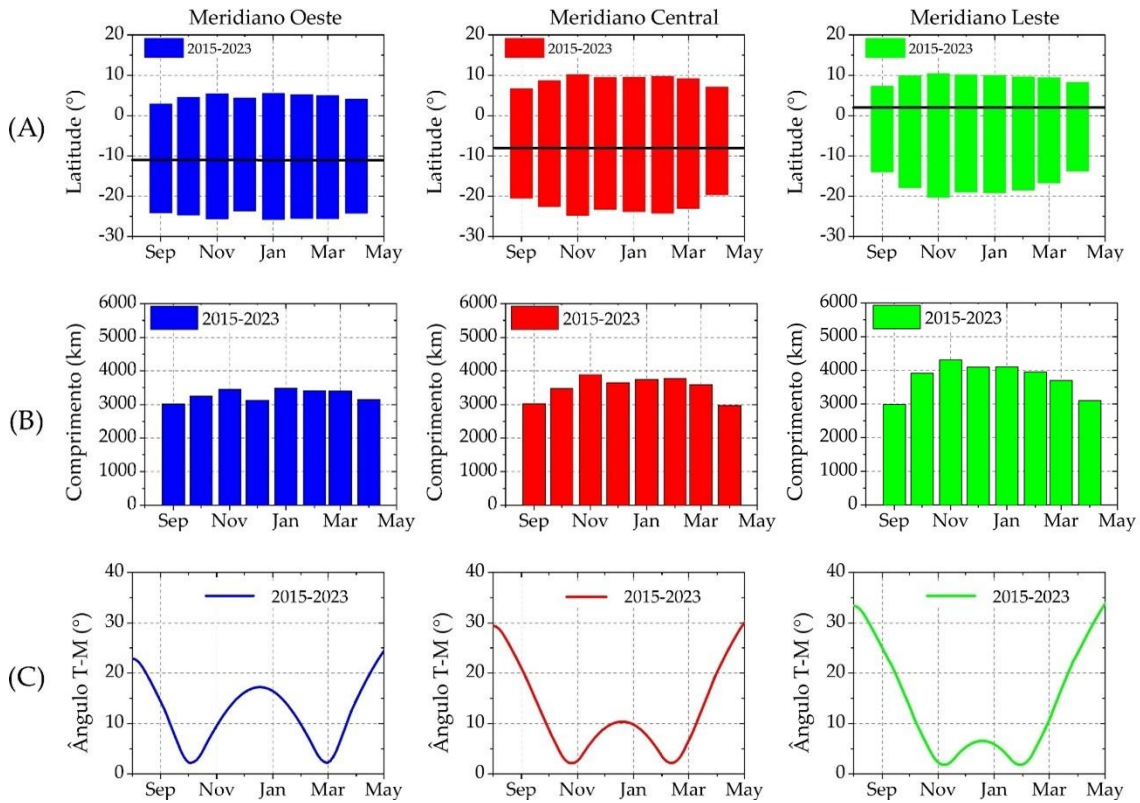
maiores comprimentos das bolhas em dezembro e fevereiro (transição entre equinócio e verão) e outros anos com maiores comprimentos durante os meses de verão.

O comprimento das EPBs, bem como seus limites latitudinais, está intrinsecamente relacionado à altura máxima que a irregularidade atinge no equador magnético, uma vez que esse fator controla a distância que as bolhas se difundem ao longo das linhas de campo em ambos os hemisférios magnéticos (WHALEN, 2002). Nesse sentido, o deslocamento vertical das EPBs na região equatorial é controlado principalmente pela velocidade do PRE. De acordo com Barros (2017), velocidades de deriva vertical mais intensas resultam em uma taxa de crescimento mais elevada da RTI, o que leva a um maior desenvolvimento latitudinal das EPBs. Com base nos resultados apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7, a variação semianual observada na costa oeste e os picos no verão na costa leste refletem a variação sazonal do PRE, a qual possui uma forte dependência com o ângulo de declinação magnética (ABDU et al., 1981 e BATISTA et al., 1986).

Outro ponto relevante a ser discutido com base nos resultados das Figuras 6.6 e 6.7 é a clara dependência longitudinal na extensão latitudinal das EPBs, a qual tende a aumentar à medida que se aproxima da costa leste da América do Sul. Os maiores comprimentos sobre o setor leste são um reflexo dos valores mais elevados da deriva vertical ao longo de todo o ano nesse meridiano, em comparação com os meridianos oeste e central (ver BATISTA et al., 1986; FEJER et al., 2008; KIL et al., 2009).

Na Figura 6.8 apresentam-se gráficos das médias mensais da extensão latitudinal (A) e do comprimento (B) das EPBs para os meridianos oeste (painel esquerdo, em azul), central (painel do centro, em vermelho) e leste (painel direito, em verde), nos meses de setembro a maio de 2015 a 2023. Em adição, são apresentados gráficos das médias mensais do ângulo calculado entre o meridiano magnético e o terminador solar às 18:00 LT (C) para os três meridianos, seguindo a discussão apresentada em Abdu et al. (1992).

Figura 6.8 – Médias mensais das extensões latitudinais máximas (A) alcançadas pelas EPBs ao longo dos meses de setembro a maio de 2015 a 2023, juntamente com as médias do comprimento estimado (B) e do ângulo calculado entre terminador solar e meridiano (C), para cada um dos meridianos magnéticos: oeste (coluna esquerda, gráficos em azul), central (coluna do centro, gráficos em vermelho) e leste (coluna direita, gráficos em verde). Nas representações gráficas em ‘A’, a linha em preto representa a latitude do equador magnético em cada um dos meridianos.



Fonte: Produção do autor.

Os resultados apresentados na Figura 6.8 indicam que, de fato, o desenvolvimento latitudinal das EPBs segue um padrão sazonal durante períodos geomagneticamente calmos. Isso fica evidente ao comparar os gráficos A e B com as médias mensais do ângulo entre o terminador solar e o meridiano magnético, definido neste trabalho como ângulo T-M (C). Observa-se que os maiores comprimentos e extensões latitudinais tendem a se concentrar em dois períodos com ângulos T-M mais baixos, os quais coincidem com os meses de maior simultaneidade entre horários de pôr do Sol em regiões E conjugadas e, conseqüentemente, maiores velocidades de deriva vertical, conforme discutido por Batista et al. (1986). Um ponto interessante nesse aspecto é que a curva de transição entre os dois períodos de maior simultaneidade entre o terminador solar e o

meridiano magnético é mais acentuada no meridiano oeste, onde o ângulo T-M atinge $\sim 18^\circ$ próximo a dezembro. Nesse contexto, nota-se uma redução no desenvolvimento latitudinal das EPBs próximo a dezembro sobre esse meridiano. Por outro lado, verifica-se que nos meridianos central e leste a amplitude do ângulo T-M durante o período de transição entre os dois pontos de maior simultaneidade tende a diminuir gradativamente. Isso reflete em um desenvolvimento mais regular das EPBs no período de transição nos meridianos leste e central em comparação com a costa oeste, conforme observado nos gráficos de comprimento e extensão latitudinal. Conforme destacado por [Abdu et al. \(1992\)](#), o grau de simultaneidade entre o meridiano magnético e o terminador solar é considerado um fator preponderante na ocorrência das EPBs. Assim, é plausível esperar que uma combinação de fatores, incluindo o módulo da declinação magnética, contribua para um maior desenvolvimento latitudinal das EPBs.

6.4 Variabilidade sazonal das assimetrias inter-hemisféricas observadas em eventos de EPBs

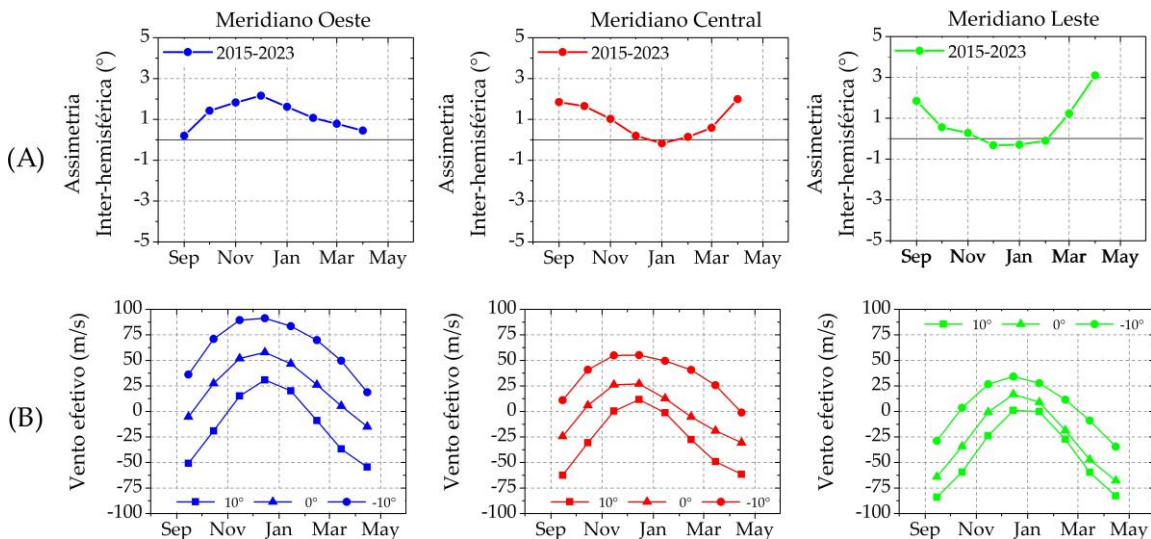
Nesta seção apresenta-se uma análise do comportamento sazonal das assimetrias inter-hemisféricas observadas durante eventos de EPBs no período entre 01/01/2015 e 30/04/2023, conforme a metodologia apresentada no Capítulo 5 deste trabalho. Para isso, foram calculadas as médias mensais dos dados de assimetrias obtidos para cada um dos meridianos magnéticos: oeste, central e leste. A discussão desses resultados é feita considerando a fenomenologia capaz de produzir as assimetrias, segundo estudos encontrados na literatura científica.

Na Figura 6.9 estão representadas as médias mensais dos valores de assimetria inter-hemisférica (A) calculados para eventos de EPBs ocorridos em dias geomagneticamente calmos, nos meses de setembro a maio de 2015 a 2023, excluindo o ano de 2020. A linha em preto representa o equador magnético. Valores positivos representam uma assimetria para norte enquanto valores negativos representam uma assimetria para o sul. Adicionalmente, são exibidas as médias mensais da velocidade do vento efetivo (B) no mesmo período, considerando pontos conjugados com inclinação magnética de 10° , 0° e -10° . Nos dois painéis, A e B, os dados referentes ao meridiano oeste estão representados nos gráficos à esquerda (linhas em azul), os dados do meridiano central são apresentados

no painel do centro (linhas em vermelho), e os dados do meridiano leste estão dispostos no painel à direita (linhas em verde).

Ressalta-se que o vento efetivo corresponde à componente do vento termosférico na direção da linha de campo geomagnético, conforme descrito em diversos trabalhos encontrados na literatura científica (LU et al., 1995; NOGUEIRA, 2013). Nesta tese, esses dados foram obtidos utilizando o modelo HWM-14 (do inglês *Horizontal Wind Model 14*) para as 18:00 LT, em uma altitude de 350 km. Ressalta-se que o domínio do índice DIX impõe certa limitação ao cálculo da assimetria inter-hemisférica para o meridiano leste. Para corrigir isso, realizou-se um ajuste dos dados de assimetria por meio do cálculo de um fator de compensação, o qual leva em consideração a variabilidade longitudinal das propriedades morfológicas das EPBs. Maiores detalhes sobre essa função podem ser encontrados na Seção 6.5 deste trabalho.

Figura 6.9 – A: Médias mensais dos valores de assimetria inter-hemisférica ($^{\circ}$) obtidos durante eventos de EPBs nos meridianos oeste (painel esquerdo), central (painel do centro) e leste (painel direito), nos meses de setembro a maio de 2015 a 2023. A linha em preto representa o equador magnético. B: Médias mensais dos valores de vento efetivo (m/s) calculados em pontos conjugados nos meridianos oeste (painel esquerdo), central (painel do centro) e leste (painel direito), nos meses de setembro a maio de 2015 a 2023.



Fonte: Produção do autor.

A análise dos resultados apresentados na Figura 6.9 revela uma tendência predominante de assimetrias positivas nos três meridianos magnéticos. Mais especificamente, no

meridiano oeste as assimetrias se concentram principalmente nos meses de novembro, dezembro e janeiro. Enquanto isso, nos meridianos central e leste as assimetrias são mais predominantes em setembro, outubro e abril. É relevante mencionar a influência significativa das diferenças observadas na posição do equador magnético em cada meridiano. No meridiano oeste, o equador magnético está localizado aproximadamente 11 graus ao sul do equador geográfico. No meridiano central, a latitude do equador magnético é de -8°S , e no meridiano leste, ela corresponde a -2°S . Essas diferenças longitudinais na localização geográfica do equador magnético ressaltam a necessidade de examinar as variações nos ventos termosféricos, conforme discutido em [Carrasco et al. \(2017\)](#) e [Barros et al. \(2022\)](#). No primeiro estudo, os autores sugerem que os ventos meridionais transequatoriais podem atuar como inibidores do desenvolvimento de EPBs no hemisfério oposto ao da origem dos ventos. Por outro lado, [Barros et al. \(2022\)](#) sustentam que essa inibição ocorre no mesmo hemisfério em que os ventos têm sua origem.

Observa-se que no meridiano oeste as assimetrias parecem seguir a sazonalidade do vento efetivo, ou seja, a assimetria predominante para o norte coincide com o vento soprando na mesma direção. Essa observação reforça as conclusões de [Krall et al. \(2009\)](#), que afirmam que ventos meridionais transequatoriais provocam o rebaixamento da crista da EIA no hemisfério oposto à sua origem, e vice-versa. Por outro lado, ao se analisar os dados dos meridianos central e leste, é evidente que o comportamento sazonal das assimetrias inter-hemisféricas se inverte. Nessas regiões, as assimetrias são observadas apenas nos meses de setembro, outubro e abril, coincidindo com os períodos de maior predominância de ventos efetivos em direção ao sul.

Uma possível causa para a variabilidade no comportamento assimétrico das EPBs em função do setor longitudinal pode estar associada ao grau de proximidade entre o equador magnético e o geográfico. Nesse sentido, sabe-se que na costa leste da América do Sul há uma maior proximidade entre o equador geográfico e o magnético do que na costa oeste. Nesse contexto, tal configuração propicia uma maior injeção de energia térmica na termosfera em latitudes próximas ao equador magnético, uma vez que o ângulo solar zenital sobre o equador magnético será menor. Consequentemente, surgirão gradientes horizontais de pressão mais acentuados, gerando uma maior velocidade nos ventos termosféricos e produzindo uma componente do campo elétrico zonal mais intensa, a

qual, por sua vez, produzirá maiores velocidades de deriva vertical do plasma. Essa explicação pode ser dada em função do comportamento assimétrico na deriva vertical do plasma, a qual poderia ocasionar as assimetrias no desenvolvimento das EPBs, conforme mencionado por [Carrasco et al. \(2017\)](#).

É importante ressaltar que uma análise mais aprofundada das causas da assimetria inter-hemisférica em EPBs demanda informação adicional, tal como dados de deriva vertical do plasma em pontos conjugados. No entanto, sumarizam-se como possíveis mecanismos de controle das assimetrias no desenvolvimento das EPBs as diferenças na declinação magnética, as variações na deriva vertical e a proximidade entre o equador geográfico e o equador magnético, conforme mencionado por [Abdu et al. \(2009\)](#). Assim, sugere-se que a dominância dos ventos transequatoriais sobre a assimetria inter-hemisférica das EPBs seja significativa apenas em regiões próximas à costa oeste da América do Sul e que o grau de proximidade entre o equador geográfico e o equador magnético possa desempenhar um papel relevante nesse contexto.

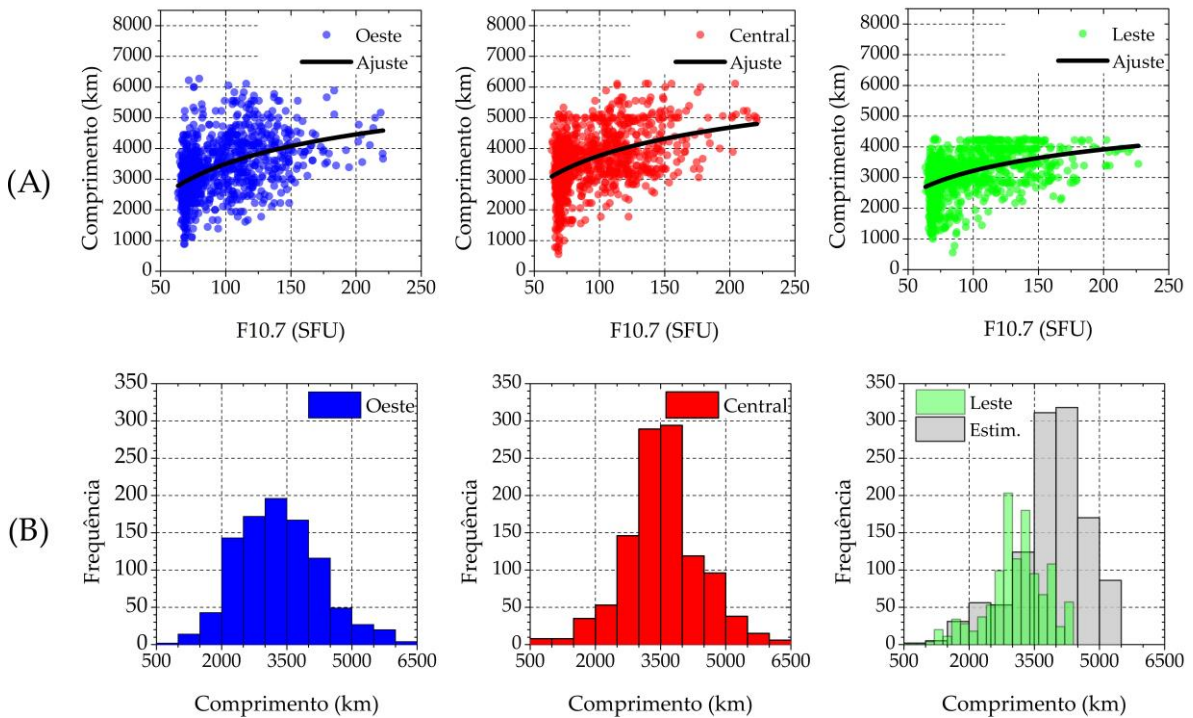
6.5 Proposta de modelo empírico para o desenvolvimento latitudinal e a variabilidade longitudinal das EPBs

Nesta seção são apresentados resultados de simulações computacionais sobre a variabilidade no desenvolvimento latitudinal das EPBs em função de diferentes níveis de fluxo solar e para diferentes setores de declinação magnética. Para isso, foi desenvolvido um modelo empírico utilizando os dados apresentados nas Seções de 6.1 a 6.4, tendo como base a fundamentação teórica sobre o desenvolvimento de EPBs explorada nos principais estudos encontrados na literatura científica. O modelo proposto deverá ser ampliado em etapas futuras para considerar a variabilidade sazonal, bem como aprimorar o ajuste do grau de saturação no desenvolvimento das EPBs em função do fluxo solar. Além disso, espera-se realizar futuramente uma análise de validação tendo como referência dados de satélite (e.g. GOLD).

Na Figura 6.10 são apresentados gráficos de dispersão (A) ilustrando a relação entre o comprimento (km) das EPBs e o fluxo solar (SFU), considerando os dados obtidos entre 2015 e 2023, com exceção de 2020. As linhas em preto representam os ajustes da função logarítmica feitos para cada conjunto de dados. Também são exibidos histogramas (B) mostrando a distribuição de intervalos de comprimento dos eventos de EPBs. Para ambos

os painéis, A e B, gráficos em azul representam dados do meridiano oeste, gráficos em vermelho representam dados do meridiano central e gráficos em verde representam dados do meridiano leste. Adicionalmente, ressalta-se que os dados do meridiano leste foram corrigidos utilizando um fator de compensação, calculado por meio de uma função de declinação magnética, a ser apresentada a seguir. Sendo assim, os dados corrigidos são representados pelas barras em cinza exibidas mesmo gráfico.

Figura 6.10 – A: Gráficos de dispersão representando a relação entre os valores de F10.7 (SFU) e os comprimentos (km) das EPBs no período de 01/01/2015 a 30/04/2023 para os meridianos oeste (painel esquerdo, em azul), central (painel do centro, em vermelho) e leste (painel da direita, em verde). As linhas em preto representam os ajustes da função logarítmica feita para cada meridiano. B: Histogramas que ilustram a distribuição dos comprimentos das perturbações ionosféricas em cada um dos meridianos: oeste (painel esquerdo, em azul), central (painel do centro, em vermelho) e leste (painel da direita, em verde). Adicionalmente, exibe-se junto ao gráfico do meridiano leste um histograma (barras em cinza) estimado utilizando um fator de compensação.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.10 destaca importantes características morfológicas das EPBs. Observa-se que o comprimento (km) aumenta em resposta à intensificação do fluxo solar (SFU). No entanto, é evidente uma tendência de saturação no desenvolvimento das EPBs para

valores elevados de fluxo solar. Esses resultados estão em concordância com estudos anteriores, os quais consideram a variabilidade de diversos fenômenos da eletrodinâmica da ionosfera equatorial em função da atividade solar (FEJER et al., 1991; NOGUEIRA et al., 2013; SANTOS et al., 2013). Nesse sentido, ressalta-se que esse ponto de saturação está relacionado aos limites físicos associados aos principais mecanismos formadores das EPBs durante períodos geomagneticamente calmos, tais como o PRE, o vento termosférico e a condutividade Pedersen no período próximo ao pôr do Sol.

Ao se observar os gráficos de dispersão na Figura 6.10, nota-se que a relação entre o desenvolvimento latitudinal das EPBs e o fluxo solar é, de fato, não-linear. Outro aspecto morfológico de destaque é que o comprimento das EPBs demonstra variações significativas entre os meridianos. Nesse sentido, nota-se que o comprimento das EPBs é maior no meridiano leste, seguido pelo meridiano central, enquanto apresenta valores menores no meridiano oeste. Isso leva às seguintes observações:

1. Durante o pico do ciclo solar, as EPBs atingem seu desenvolvimento máximo;
2. Esse desenvolvimento está diretamente associado à intensificação dos mecanismos geradores das irregularidades;
3. A relação entre a intensificação do fluxo solar e o desenvolvimento das EPBs segue uma tendência crescente, porém não-linear, apresentando uma saturação após um determinado nível de fluxo solar;
4. Observa-se uma variação longitudinal no comprimento das EPBs, a qual está relacionada ao módulo do ângulo de declinação magnética.

Neste trabalho realizou-se um ajuste logarítmico para representar matematicamente o desenvolvimento latitudinal das EPBs como uma função do fluxo solar e da declinação magnética. Portanto, os ajustes logarítmicos apresentados nos gráficos da Figura 6.10 são utilizados neste trabalho para a definição de um modelo empírico capaz de estimar o comprimento máximo (L_{max}) das EPBs em função da atividade solar e da declinação magnética. Na Equação 6.1, apresenta-se a formulação matemática do modelo L_{max} , dado em km:

$$L_{max} = 1,375a * \ln (-b * \ln(SF)) , \quad (6.1)$$

onde a e b são coeficientes de escala e translação vertical da função logarítmica, respectivamente. O termo SF representa o índice F10.7, dado em SFU.

Os coeficientes a e b podem ser obtidos por meio das Equações 6.2 e 6.3, respectivamente:

$$a = 7,1046 \times 10^3 + (44,28(D)) \quad (6.2)$$

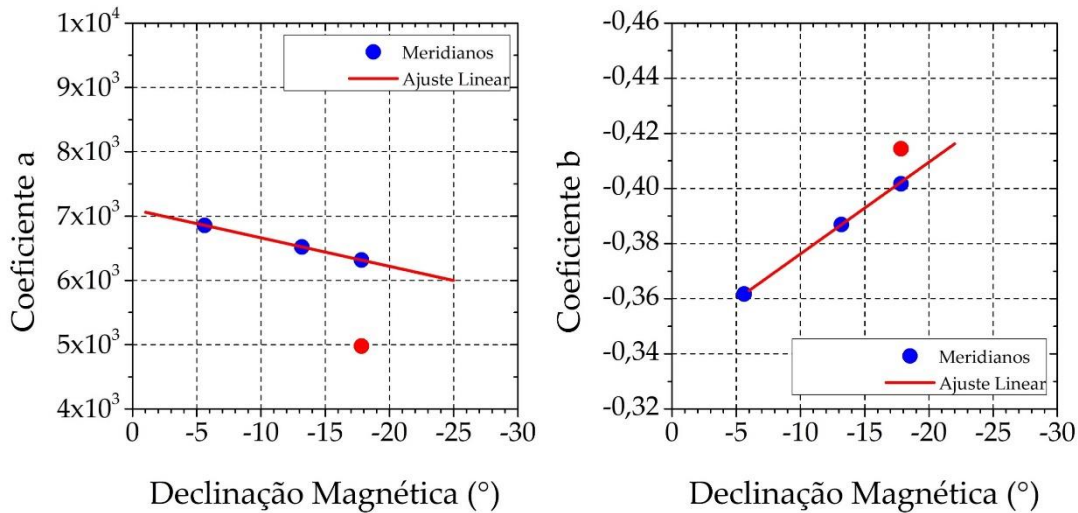
$$b = -3,4 \times 10^{-1} + (3,3 \times 10^{-3}(D)) \quad (6.3)$$

Nas Equações 6.2 e 6.3, o termo D representa o módulo da declinação magnética na latitude do equador magnético.

Conforme mencionado anteriormente, os coeficientes a e b são os termos de escala e translação vertical da função logarítmica, sendo obtidos individualmente para cada um dos ajustes apresentados na Figura 6.10. No entanto, é possível obter os coeficientes em função da declinação magnética de cada meridiano, conforme apresentado a seguir.

Na Figura 6.11 apresentam-se gráficos dos coeficientes a (painel esquerdo) e b (painel direito), obtidos para cada um dos três meridianos em função da declinação magnética de cada meridiano. Os símbolos em azul da esquerda para a direita representam, respectivamente, os meridianos de oeste a leste. As linhas em vermelho representam o ajuste linear obtido para cada um dos conjuntos de dados. Os símbolos em vermelho representam os coeficientes obtidos para o meridiano leste, os quais foram descartados e recalculados.

Figura 6.11 – Gráficos de dispersão ilustrando a relação linear entre os valores dos coeficientes a (painel esquerdo) e b (painel direito) e a declinação magnética de cada meridiano. Nos gráficos, a linha em vermelho representa a reta do ajuste linear de cada função obtida, enquanto os pontos em vermelho indicam os valores descartados em função da limitação do meridiano leste.



Fonte: Produção do autor.

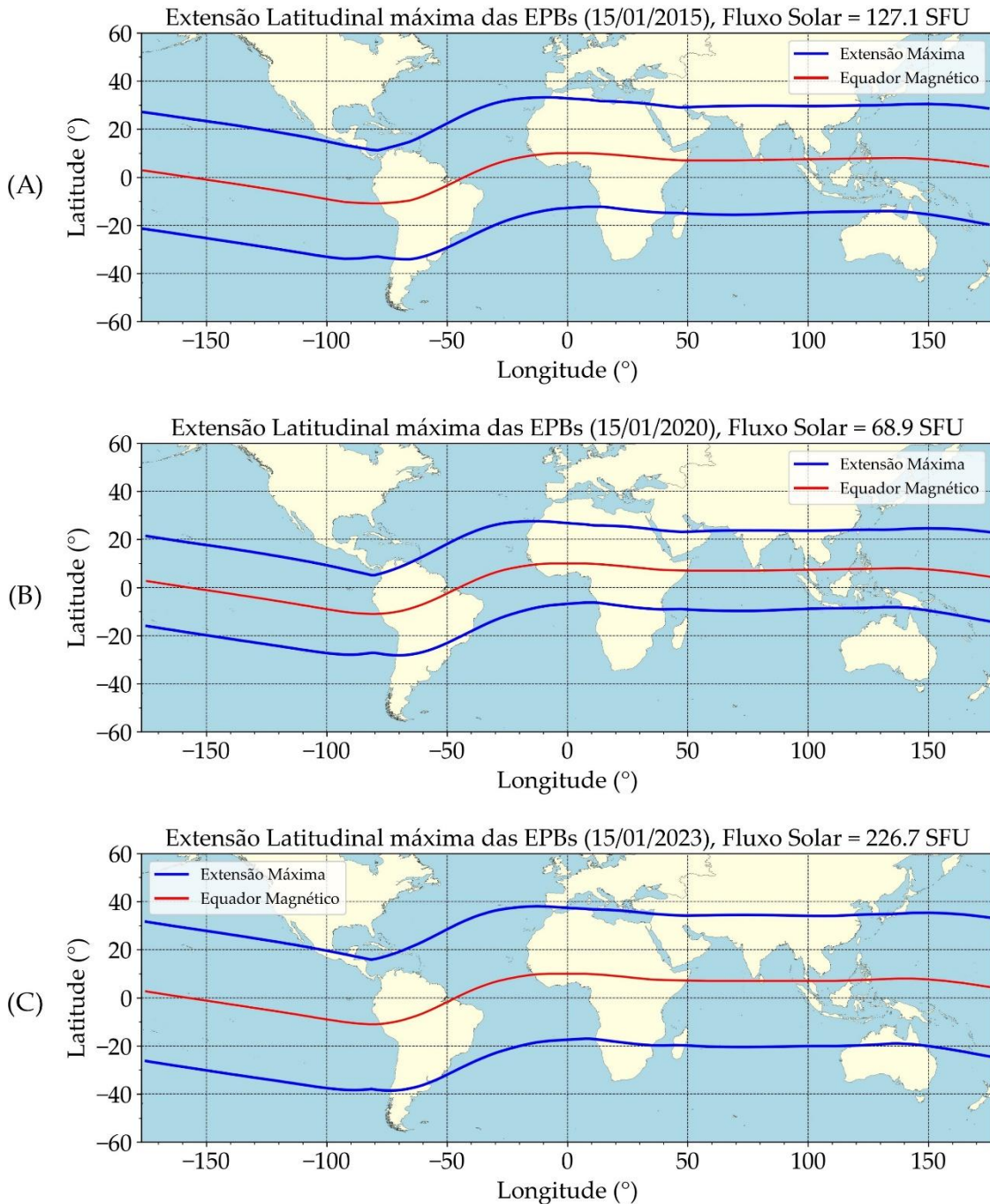
Ao se observar os resultados apresentados na Figura 6.12, nota-se uma clara dependência dos coeficientes a e b com a declinação magnética. Para se obter essa função, foram calculados os coeficientes do ajuste logarítmico de cada meridiano, conforme apresentados nos gráficos dessa figura. No painel esquerdo estão representados os valores do coeficiente a específicos para os meridianos oeste, central e leste, onde observa-se uma tendência de diminuição em função da declinação magnética. No entanto, nota-se que o coeficiente a do meridiano leste apresenta uma diferença de amplitude devido aos limites do domínio do índice DIX. Portanto, esse coeficiente é desconsiderado no ajuste linear (símbolo vermelho). Logo, o ajuste é feito considerando apenas os coeficientes a dos meridianos oeste e central e um novo coeficiente é calculado para o meridiano leste. Por outro lado, observa-se no painel direito da figura que os valores de coeficiente b tendem a aumentar com a declinação magnética. O mesmo processo é feito para esse termo, onde realiza-se o ajuste utilizando apenas os valores dos meridianos oeste e central e recalcula-se o valor do coeficiente para o meridiano leste. Finalmente, os ajustes são feitos considerando dados dos três meridianos magnéticos para cada um dos coeficientes, a e b , resultando nas Equações 6.2 e 6.3, respectivamente.

Na Figura 6.12 apresentam-se mapas globais de extensão latitudinal máxima de EPBs em função da declinação e fluxo solar, obtidos utilizando o modelo L_{max} . Esses resultados foram calculados para três datas específicas: 15/01/2015 (127,1 SFU), 15/01/2020 (68,9 SFU) e 15/01/2023 (226,7 SFU). As linhas em azul representam as latitudes máximas alcançadas pelas EPBs em cada hemisfério magnético. A linha em vermelho representa o equador magnético.

Os resultados apresentados na Figura 6.12 são exemplos das extensões latitudinais máximas que as EPBs podem alcançar em períodos geomagneticamente calmos, considerando o fluxo solar e a declinação magnética. Esses resultados se mostram importantes para estudar a climatologia das irregularidades ionosféricas em diferentes níveis de atividade solar. Uma aplicação prática pode ser feita utilizando dados obtidos utilizando a previsão do ciclo solar realizado pela NASA/NOAA¹³. Ao se utilizar os dados previstos de F10.7 como entrada para o modelo L_{max} , é possível estimar o desenvolvimento latitudinal máximo das EPBs, sendo esta uma ferramenta importante na previsão do clima espacial.

¹³ <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

Figura 6.12 – Mapas ilustrando os resultados de simulações das extensões latitudinais máximas alcançadas pelas EPBs durante períodos geomagneticamente calmos em função da declinação magnética e do fluxo solar. Os dados foram obtidos para as seguintes datas: 15/01/2015 (A), 15/01/2020 (B) e 15/01/2023 (C). Nos mapas, as linhas em azul representam as latitudes máximas alcançadas pelas EPBs em ambos os hemisférios, enquanto as linhas em vermelho representam as coordenadas do equador magnético em cada uma das datas mencionadas.



Fonte: Produção do autor.

Nesta seção apresentou-se um modelo empírico para avaliar o desenvolvimento latitudinal máximo das EPBs em relação à atividade solar, considerando as variações longitudinais associadas às mudanças no ângulo de declinação magnética. Os resultados deste modelo são promissores, no entanto, também sinalizam a demanda por uma análise mais aprofundada na modelagem do desenvolvimento das EPBs, levando em consideração a variabilidade de seus mecanismos geradores.

Os resultados apontam que há espaço para o aprimoramento do modelo, particularmente em relação à inclusão dos termos necessários para modelar a variação sazonal das EPBs em diferentes setores longitudinais. Além disso, mostra-se importante refinar a estimativa do ponto de saturação no desenvolvimento das EPBs em relação ao fluxo solar. Esses pontos, identificados ao longo desta pesquisa, representam áreas prioritárias no que diz respeito a investigações futuras. Nesse contexto, ressalta-se que uma análise mais detalhada desses aspectos poderá contribuir para uma melhor compreensão da variabilidade deste complexo fenômeno da ionosfera.

Portanto, pesquisas futuras devem se concentrar no aprimoramento desses resultados, o que inclui a realização de uma análise abrangente da variação sazonal e uma comparação sistemática com dados observacionais. Essa abordagem gradual não apenas consolidará as descobertas já feitas, mas também poderá estabelecer as bases para contribuições significativas na compreensão e na capacidade de previsão do desenvolvimento das bolhas de plasma.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho estuda as características morfológicas das bolhas de plasma e sua relação com a variabilidade dos seus mecanismos de formação. Dessa forma, desenvolveu-se uma metodologia baseada na utilização de dados de GNSS visando quantificar a variabilidade do plasma ionosférico durante a ocorrência de perturbações ionosféricas associadas a EPBs. Essa metodologia foi aplicada ao estudo das características das EPBs ao longo das diferentes etapas dos ciclos solares 24 e 25, considerando também diferentes aspectos físicos da área de estudo. Para isso, os resultados foram analisados tendo como foco a compreensão da eletrodinâmica da ionosfera noturna durante períodos geomagneticamente calmos entre 2015 e 2023, correspondendo ao intervalo entre a fase pós-pico do ciclo solar 24 e a fase pré-pico do ciclo solar 25. Na Seção 7.1 são sumarizadas as principais conclusões obtidas deste trabalho. Em seguida, a Seção 7.2 apresenta questões em aberto identificadas durante o desenvolvimento desta tese, as quais requerem maior atenção em trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

1. A amplitude de depleção e o desenvolvimento latitudinal das bolhas de plasma apresentam um ciclo de ~11 anos, o qual é controlado pelo nível de atividade solar.
2. O ciclo das EPBs se inicia no período de baixa atividade solar, onde as bordas destas encontram-se mais próximas do equador magnético e a amplitude das depleções de plasma é menor. À medida que a atividade solar se intensifica, as bordas das EPBs tendem a se afastar do equador magnético, atingindo uma latitude máxima, e a amplitude das depleções de plasma passa a aumentar. Finalmente, conforme a intensidade da atividade solar diminui, as bordas das EPBs voltam a se aproximar do equador magnético, atingindo uma latitude mínima observada, e as depleções de plasma passam a apresentar uma magnitude mínima.
3. O principal mecanismo responsável pela variabilidade da extensão latitudinal e da amplitude das depleções de plasma durante o ciclo das EPBs é a velocidade da deriva vertical do plasma durante o PRE. Essa dependência decorre da formação

- do dínamo da Região F no pôr do Sol, o qual é controlado pelo vento termosférico zonal e pela intensidade das condutividades, ambos dependentes do fluxo solar.
4. A extensão latitudinal das EPBs apresenta variações longitudinais associadas à declinação magnética. Esse fator está relacionado ao grau de simultaneidade entre o meridiano magnético e o terminador solar (ângulo T-M), o qual controla a diferença de tempo entre os horários de pôr do Sol em pontos conjugados na Região E. Portanto, quanto menor for o ângulo T-M, maior será a velocidade da deriva vertical do plasma durante a ocorrência do PRE, o que resultará em EPBs com maior extensão latitudinal.
 5. A amplitude das depleções de plasma associadas às EPBs é proporcional à quantidade de plasma no ambiente, a qual tende a ser maior na costa leste do que na costa oeste da América do Sul. Essa configuração resulta na formação de gradientes verticais de plasma mais significativos e, como consequência, os valores de DIX durante as EPBs são mais elevados na costa leste em comparação com a costa oeste da América do Sul.
 6. A variabilidade sazonal da intensidade das EPBs mostra uma dependência com o setor longitudinal. Nesse contexto, observam-se depleções de plasma mais intensas sobre a costa oeste da América do Sul durante os meses de equinócio. Por outro lado, na costa leste, os picos de intensidade das EPBs exibem um padrão similar tanto nos meses de equinócio quanto nos de verão.
 7. Uma explicação para o comportamento sazonal na intensidade das EPBs está relacionada às diferenças entre a costa oeste e a costa leste da América do Sul, tanto em relação à quantidade de plasma no ambiente quanto à intensidade do PRE. Na costa oeste, os valores de TEC e PRE atingem níveis mais elevados durante os meses de equinócio, o que leva a perturbações mais intensas no DIX durante esses períodos. Por outro lado, na costa leste, os maiores valores de TEC são observados nos meses de equinócio, enquanto os picos de PRE ocorrem durante o verão. Essa configuração resulta em uma variação semianual menos evidente na intensidade das EPBs ao longo da costa leste. Como resultado, os picos de intensidade no DIX ocorrem mais próximos a dezembro nessa região, embora ainda sejam observados valores elevados durante os meses de verão.

8. Observou-se que a sazonalidade do desenvolvimento morfológico das EPBs varia conforme o grau de simultaneidade entre o terminador solar e os meridianos magnéticos, o que se torna menos evidente durante períodos de alta atividade solar.
9. Observou-se a presença de assimetrias inter-hemisféricas no desenvolvimento das EPBs, sendo mais pronunciadas nas proximidades da costa oeste da América do Sul. Além disso, o comportamento assimétrico das EPBs nessa região apresentou uma concordância com o sentido dos ventos termosféricos efetivos.
10. O desenvolvimento latitudinal e a amplitude de depleção das EPBs aumentam à medida que o fluxo solar se intensifica. No entanto, observa-se um comportamento de saturação nessa dependência, o qual está relacionado aos limites físicos associados aos principais mecanismos de formação das EPBs durante períodos geomagneticamente calmos, tais como o PRE, o vento termosférico e a condutividade Pedersen no período próximo ao pôr do Sol.
11. Desenvolveu-se um modelo empírico para calcular a extensão latitudinal máxima das EPBs em função do fluxo solar e da declinação magnética. Esse modelo fornece informações importantes que podem ser utilizadas na estimativa de desenvolvimento das EPBs durante diferentes etapas do ciclo solar e em diferentes setores de longitude.

7.2 Trabalhos futuros

Os resultados apresentados neste trabalho fomentam um conhecimento mais aprofundado sobre o desenvolvimento morfológico das bolhas de plasma na ionosfera equatorial, bem como sua relação com diversos fatores, tais como a atividade solar, declinação magnética, dentre outros. Embora alcançados os objetivos propostos neste trabalho, identificam-se novas questões em aberto no que diz respeito à compreensão da formação de bolhas de plasma sob diferentes condições eletrodinâmicas. Dessa forma, apresenta-se abaixo uma lista dos principais pontos que foram identificados e que requerem maior atenção em trabalhos futuros.

1. Realizar um estudo climatológico de modo a analisar as diferenças observadas no comportamento das EPBs durante períodos geomagneticamente calmos e durante

- eventos de clima espacial de diferentes intensidades e causas (e.g. CMEs, Solar Flares);
2. Realizar uma análise empírica e teórica sobre os mecanismos de geração/supressão de bolhas de plasma durante diferentes níveis de atividade geomagnética, associados a eventos de CMEs e Solar Flares, com o objetivo de compreender possíveis interações e/ou competições entre mecanismos físicos;
 3. Avaliar a variabilidade global do desenvolvimento de bolhas de plasma em períodos geomagneticamente calmos por meio da comparação de dados de outros instrumentos (e.g. satélite GOLD) com os resultados do modelo L_{max} ;
 4. Aprimorar o modelo L_{max} para incluir os termos necessários para modelar a variação sazonal das EPBs em diferentes setores longitudinais;
 5. Realizar uma análise mais detalhada dos coeficientes do modelo L_{max} de modo a refinar a estimativa do ponto de saturação no desenvolvimento das EPBs em relação ao fluxo solar.
 6. Analisar a periodicidade das bolhas de plasma durante diferentes níveis de atividade geomagnética, buscando correlacionar os padrões de ocorrência, extensão latitudinal e intensidade de depleção com a frequência dos seus mecanismos geradores;
 7. Analisar de forma aprofundada a competição entre os mecanismos apresentados por [Abdu et al. \(1981\)](#) e [Batista et al. \(1986\)](#) com o grau de proximidade entre equador magnético e geográfico durante diferentes etapas do ciclo solar, buscando compreender a influência de cada processo físico sobre a sazonalidade das EPBs;
e
 8. Analisar as possíveis causas para a saturação observada no desenvolvimento das bolhas de plasma em função do fluxo solar, tendo como base a compreensão dos limites físicos na variabilidade da deriva vertical do plasma em função do vento termosférico zonal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARONS, J.; MENDILLO, M.; YANTOSCA, R.; KUDEKI, E. GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 101, n. A12, p. 26851–26862, 1996. Doi:10.1029/96ja00981.

ABADI, P.; OTSUKA, Y.; TSUGAWA, T. Effects of pre-reversal enhancement of $E \times B$ drift on the latitudinal extension of plasma bubble in Southeast Asia. **Earth, Planets and Space**, v.67, e74, 2015. Doi: 10.1186/s40623-015-0246-7.

ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A.; BATISTA, I. S. Magnetic declination control of the equatorial F region dynamo field development and spread F. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 86, n. 11, p.11443–11446, 1981. Doi: 10.1029/JA086iA13p114403.

ABDU, M.; MEDEIROS, R.; SOBRAL, J.; BITTENCOURT, J. Spread f plasma bubble vertical rise velocities determined from spaced ionosonde observations. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 88, n. A11, p. 9197–9204. 1983. Doi: 10.1029/JA088iA11p09197.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. A new aspect of magnetic declination control of equatorial spread F and F region dynamo. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A10, e14897, 1992. Doi: 10.1029/92ja00826.

ABDU, M. A. Equatorial spread F and ionosphere–thermosphere system: a review. **Trends in Geophysics Research**, v. 2, p. 193-209, 1993.

ABDU, M. A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere system relevant to spread F. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 9, p. 869–884, 2001. Doi: 10.1016/S1364-6826(00)00201-7.

ABDU, M. A. Equatorial ionosphere–thermosphere system: electrodynamic and irregularities. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 5, p. 771–787, 2005. Doi: 10.1016/j.asr.2005.03.150.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; REINISCH, B. W.; SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H. A.; PEDERSEN, T. R.; MEDEIROS, A. F.; SCHUCH, N. J.; PAULA, E. R.; GROVES, K. M. Conjugate Point Equatorial Experiment (COPEX) campaign in Brazil: electrodynamic highlights on spread F development conditions and day-to-day variability. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. A04308, 2009. Doi: 10.1029/2008JA013749.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; BRUM, C. G. M.; MACDOUGALL, J.; SANTOS, A. M.; SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H. A. Solar flux effects on the equatorial evening vertical drift and meridional winds over Brazil: a comparison between observational data and the IRI model and the HWM representations. **Advances in Space Research**, v. 46, p. 1078–1085, 2010. Doi: 10.1016/j.asr.2010.06.009.

ABDU, M. A. Day-to-day and short-term variabilities in the equatorial plasma bubble/spread F irregularity seeding and development. **Progress in Earth and Planetary Science**, v. 6, n. 1, 2019. Doi:10.1186/s40645-019-0258-1.

AGYEI-YEBOAH, E.; PAULINO, I.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; PAULINO, R.; ESSIEN, P.; LOMOTEY, S. O.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M. Seasonal variation of plasma bubbles during solar cycle 23–24 over the Brazilian equatorial region, **Advances in Space Research**, v. 64, p. 1365–1374, 2019. Doi: 10.1016/j.asr.2019.06.041.

ANDERSON, D. N.; MENDILLO, M. Ionospheric conditions affecting the evolution of equatorial plasma depletions. **Geophysical Research Letters**, v. 10, 1093. Doi: 10.1029/GL010i007p00541.

ARAGÓN PAZ, J. M.; MENDOZA, L.; FERNÁNDEZ, L. I. Near-real-time GNSS tropospheric IWV monitoring system for South America. **GPS Solutions**, v. 27, n. 2, 2023. Doi: 10.1007/s10291-023-01436-2.

BANVILLE, S.; LANGLEY, R. B. Instantaneous cycle-slip correction for real-time PPP applications. **Navigation**, v. 57, n. 4, p. 325-334, 2014. Doi: 10.1002/j.2161-4296.2010.tb01786.x.

BARBOSA-NETO, P. F. **Mapa do índice de perturbação ionosférica (DIXMAP) sobre a região da América do Sul e sua relação com tempestades geomagnéticas**. 2020. 200 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2020.

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A. Equatorial F region vertical plasma drifts: seasonal and longitudinal asymmetries in the American sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 91, n. A11, p.12,055-12,064, 1986. Doi: 10.1029/JA091iA11p12055.

BARROS, D. S. **Formação e desenvolvimento de bolhas de plasma na ionosfera equatorial: observação e simulação**. 2017. 223 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.

BARROS, D.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B. Characteristics of equatorial plasma bubbles observed by TEC map based on ground-based GNSS receivers over South America. **Annales Geophysicae**, v. 36, p. 91–100, 2018. Doi: 10.5194/angeo-36-91-2018.

- BARROS, D.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; CARRASCO, A. J.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; INOUE JUNIOR, M. H. Asymmetric development of equatorial plasma bubbles observed at geomagnetically conjugate points over the Brazilian sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.127, e2021JA030250, 2022. Doi: 10.1029/2021JA030250.
- BARTELS, J. Potsdamer erdmagnetische Kennziffern, 1. Mitteilung. **Zeitschrift für Geophysik**, v.14, p. 68–78, 1938. Doi: 10.23689/fidgeo-3165.
- BARTELS, J. The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp. **IATME Bulletin**, v.12b, p.97–120, 1949.
- BATISTA, I. S. **Dínamo da região F equatorial: assimetrias sazonais e longitudinais no setor americano**. 160 p. Tese (Doutorado em Ciência Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.
- BATISTA, I. S.; MEDEIROS, R. T.; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; BAILEY, G. J.; PAULA, E. R. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. A5, p.10,887-10,892, 1996. Doi: 10.1029/95JA03833.
- BERNHARDT, P. A. Quasi-analytic models for density bubbles and plasma clouds in the equatorial ionosphere: 2. a simple Lagrangian transport model. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. A11, 2007. Doi: 10.1029/2007ja012287.
- BIANCHI, C.; MENDOZA, L.; FERNÁNDEZ, L.; NATALI, M. P.; MEZA, A.; MOIRANO, J. F. Multi-year GNSS monitoring of atmospheric IWV over Central and South America for climate studies. **Annales Geophysicae**, v. 34, n. 7, p. 623-639, 2016. Doi: 10.5194/angeo-34-623-2016.
- BITTENCOURT, J. A.; ABDU, M. A. A theoretical comparison between apparent and real vertical ionization drift velocities in the equatorial F region. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A4, p. 2451-2454, 1981. Doi: 10.1029/JA086iA04p02451.
- BLEWITT, G. An automatic editing algorithm for GPS data. **Geophysical Research Letters**, v. 17, n. 3, p. 199-202, 1990. Doi: 10.1029/GL017i003p00199.
- BUHARI, S. M.; ABDULLAH, M.; YOKOYAMA, T.; OTSUKA, Y.; NISHIOKA, M.; HASBI, A. M.; BAHARI, S. A.; TSUGAWA, T. Climatology of successive equatorial plasma bubbles observed by GPS ROTI over Malaysia. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.122, p. 2174-2184, 2017. Doi: 10.1002/2016JA023202.
- BURKE, W. J.; GENTILE, L. C.; HUANG, C. Y.; VALLADARES, C. E.; SU, S. Y. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1. **Journal of Geophysical Research**, v.109, A12301, 2004. Doi: 10.1029/2004JA010583.

CALORI, A.; SANTOS, J. R.; BLANCO, M.; PESSANO, H.; LLAMEDO, P.; ALEXANDER, P.; DE LA TORRE, A. Ground-based GNSS network and integrated water vapor mapping during the development of severe storms at the Cuyo region (Argentina). **Atmospheric Research**, v.176/177, p. 267–275, 2016. Doi: 10.1016/j.atmosres.2016.03.00.

CARRASCO, A.; BATISTA, I.; SOBRAL, J.; ABDU, M. Spread f modeling over Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 98, n. 104, 2017. Doi: 10.1016/j.jastp.2017.06.015.

CARMO, C. S.; DENARDINI, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; RESENDE, L. C. A.; PICANÇO, G. A. S.; BARBOSA NETO, P. F.; NOGUEIRA, P. A. B.; MORO, J.; CHEN, S. S. Evaluation of different methods for calculating the ROTI index over the Brazilian sector. **Radio Science**, v. 56, e2020RS007140, 2021. Doi: 10.1029/2020RS007140.

CARMO, C. S. **Estudo de irregularidades ionosféricas usando mapas de ROTI sobre a região brasileira**. 2022. 139 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

CARMO, C. S.; PI, X.; DENARDINI, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; VERKHOGLYADOVA, O. P.; PICANÇO, G. A. S. Equatorial plasma bubbles observed at dawn and after sunrise over South America during the 2015 St. Patrick's Day storm. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.127, e2021JA029934, 2022. Doi: 10.1029/2021JA029934.

CARMO, C. S.; DAI, L.; DENARDINI, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; WRASSE, C. M.; RESENDE, L. C. A.; BARROS, D.; MORO, J.; CHEN, S. S.; PICANÇO, G. A. S.; SILVA, R. P.; WANG, C.; LI, H.; LIU, Z. Equatorial plasma bubbles features over the Brazilian sector according to the solar cycle and geomagnetic activity level. **Frontiers in Astronomy and Space Sciences**, 2023. Doi: 10.3389/fspas.2023.1252511.

CHAPMAN, S. The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth. **Proceedings of the Physical Society**, v. 43, n. 1, p. 26–45, 1931. Doi:10.1088/0959-5309/43/1/305.

CHEN, Y.; LIU, L.; WAN, W. Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007-2009? **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.116, n. A4, 2011. Doi:10.1029/2010ja016301.

CHERNIAK, I.; ZAKHARENKOVA, I. First observations of super plasma bubbles in Europe, **Geophysical Research Letters**, v. 43, n.11, p.137–145, 2016. Doi: 10.1002/2016GL071421.

CHOI, J. M.; KIL, H.; KWAK, Y.-S.; PARK, J.; LEE, W. K.; KIM, Y. H. Periodicity in the occurrence of equatorial plasma bubbles derived from the C/NOFS observations in 2008-2012. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 12, p. 12,019–12,030, 2017. Doi:10.1002/2016JA023528.

CUEVA, R. Y. L. C. **Eletrodinâmica das irregularidades ionosféricas em baixas latitudes e caracterização das plumas em três setores de longitude**. 2013. 181 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

DACH, R.; SIMON, L.; WALSER, P; FRIDEZ, P. **User manual of the Bernese GNSS Software 5.2**, Bern: University of Bern, 2015.

DE JESUS, R.; BATISTA, I. S.; TAKAHASHI, H.; PAULA, E. R.; BARROS, D.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; ABREU, A. J.; JONAH, O. F.; FAGUNDES, P. R.; VENKATESH, K. Morphological features of ionospheric scintillations during high solar activity using GPS observations over the South American sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.124, 2020. Doi: 10.1029/2019JA027441.

DEMYANOV, V.; SERGEEVA, M.; FEDOROV, M.; ISHINA, T.; GATICA-ACEVEDO, V.J.; CABRAL-CANO, E. Comparison of TEC calculations based on trimble, javad, leica, and septentrio GNSS receiver data. **Remote Sensing**, v12, e3268, 2020. Doi:10.3390/rs12193268.

DENARDINI, C. M.; PICANÇO, G. A. S.; BARBOSA-NETO, P. F.; NOGUEIRA, P. A. B.; CARMO, C. S.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J.; CHEN, S. S.; ROMERO-HERNANDEZ, E.; SILVA, R. P.; BILIBIO, A. V. Ionospheric scale index map based on TEC data for space weather studies and applications. **Space Weather**, v.18, e2019SW002328, 2020a. Doi: 10.1029/2019SW002328.

DENARDINI, C. M.; PICANÇO, G. A. S.; BARBOSA-NETO, P. F.; NOGUEIRA, P. A. B.; CARMO, C. S.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J.; CHEN, S. S.; ROMERO-HERNANDEZ, E.; SILVA, R. P.; BILIBIO, A.V. Ionospheric scale index map based on TEC data during the Saint Patrick magnetic storm and EPBs. **Space Weather**, 2020b. Doi: 10.1029/2019sw002330.

DOHERTY, P.; RAFFI, E.; KLOBUCHAR, J. A.; EI-ARINI, M. B. Statistics of time rate of change of ionospheric range delay. In: ION GPS, 1994, Salt Lake City. **Proceedings...** 1994. p.1589–1599. Disponível em: , <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=3981>. Acesso em: 5 set. 2023.

DUNGEY, J. W. Convective diffusion in the equatorial F region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 9, n. 5/6, p.304–310, 1956. Doi: 10.1016/0021-9169(56)90148-9.

EASTES, R. W.; SOLOMON, S. C.; DANIELL, R. E.; ANDERSON, D. N.; BURNS, A. G.; ENGLAND, S. L.; MARTINIS, C. R.; MCCLINTOCK, W. E. Global-scale observations of the equatorial ionization anomaly. **Geophysical Research Letters**, v. 46, p. 9318–9326, 2019. Doi: 10.1029/2019GL084199.

EATHER, R. H.; MENDE, S. B. Dayside aurora studies with a keogram camera, **Antarctic Journal of the United States**, v. 15, n. 5, p. 203–211, 1981.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Galileo satellite recovered and transmitting navigation signals**. 2014. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo_satellite_recovered_and_transmitting_navigation_signals. Acesso em: 5 jun. 2023.

EVERYTHING RF. **What is the Medium Earth Orbit (MEO)?** 2018. Disponível em: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-the-medium-earth-orbit-meo>. Acesso em: 7 jun. 2023.

FAGUNDES, P.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J.; TAKAHASHI, H. Relationship between generation of equatorial F-region plasma bubbles and thermospheric dynamics. **Advances in Space Research**, v. 16, n. 5, p. 117–120, 1995. Doi: 10.1016/0273-1177(95)00180-m.

FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A.; TAKAHASHI, H. Observations of day-to-day variability in precursor signatures to equatorial F-region plasma depletions, **Annales Geophysicae**, v. 17, p. 1053–1063, 1999. Doi: 10.1007/s00585-999-1053-x.

FALCONE, M.; HAHN, J.; BURGER, T. Galileo. In: TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. (Ed.). **Springer handbook of Global Navigation Satellite Systems**. New York, USA: Springer, 2017. p. 247-272.

FARLEY, D. T.; BALSEY, B. B.; WOODMAN, R. F.; MCCLURE, J. P. Equatorial spread F: implications of VHF radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, p. 7199-7216, 1970. Doi: 10.1029/JA075i034p07199.

FARLEY, D. T.; BONELLI, E.; FEJER, B. G.; LARSEN, M. F. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 86, n. A12, p. 13723–13728, 1986. Doi: 10.1029/JA091iA12p13723.

FEJER, B. G.; FARLEY, D. T.; WOODMAN, R. F.; CALDERON, C. Dependence of equatorial F region vertical drifts on season and solar cycle. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 84, n. A10, 1979. Doi: 10.1029/JA084iA10p05792.

FEJER, B. G.; GONZALEZ, S. A.; WOODMAN, R. F. Average vertical and zonal F-region plasma drifts over Jicamarca. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 96, n.A8, p.13.901-13.906, 1991. Doi: 10.1029/91JA01171.

FEJER, B. G.; PAULA, E. R.; SCHERLISS, L.; BATISTA, I. S. Incoherent scatter radar, ionosonde, and satellite measurements of equatorial F region vertical plasma drifts in the evening sector. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 14, p.1733-1736, 1996. Doi: 10.1029/96GL01847.

FEJER, B. G.; SCHERLISS, L.; PAULA, E. R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 104, n. A9, p.19,859–19,869, 1999. Doi: 10.1029/1999JA900271.

- FEJER, B. G.; JENSEN, J. W.; SU, S.Y. Seasonal and longitudinal dependence of equatorial disturbance vertical plasma drifts, **Geophysical Research Letters**, v.35, L20106, 2008. Doi: 10.1029/2008GL035584.
- FULLER-ROWELL, T. J. The dynamics of the lower thermosphere. In: JOHNSON, R. M.; KILLEEN, T. L. **The upper mesosphere and lower thermosphere: a review of experiment and theory**. [S.l.]: Geophysical Monograph Series, 1996. P. 23-36.
- GNEVYSHEV, M. N. Essential features of the 11-year solar cycle. **Solar Physics**, v. 51, p. 175–183, 1977. Doi: 10.1007/BF00240455.
- HAERENDEL, G. **Theory of equatorial spread-f**. [S.l.]: Max-Planck Institute, 1973.
- HAERENDEL, G.; ECCLES, J. V.; CAKIR, S. Theory of modeling the equatorial evening ionosphere and origin of the shear in horizontal plasma flow. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A2, p. 1209–1223, 1992.
- HAN, Y.; CHEN, Y.; JIN, X.; TREMBLAY, D.; WANG, L. **Cross Track Infrared Sounder (CrIS) Sensor Data Record (SDR) user's guide**. Washington: NOAA, 2013.
- HEGARTY, C. J. The Global Positioning System (GPS). In: TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. (Ed.). **Springer handbook of Global Navigation Satellite Systems**. New York: Springer, 2017. p. 197-217.
- HICKEY, D. A.; SAU, S.; NARAYANAN, V. L.; GURUBARAN, S. A possible explanation of interhemispheric asymmetry of equatorial plasma bubbles in airglow images. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 125, e2019JA027592, 2020. Doi: 10.1029/2019JA027592.
- HINES, C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. **Canadian Journal of Physics**, v. 38, n. 11, p. 1441-1481, 1960. Doi: 10.1139/p60-150.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: theory and practice**. 5.ed. New York: Springer, 2001. 382 p.
- HUANG, C. S.; KELLEY, M. C. Nonlinear evolution of equatorial spreadF: 2. gravity wave seeding of Rayleigh-Taylor instability. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. A1, p. 293–302, 1996. Doi: 10.1029/95ja02210.
- HUANG, C. S.; LA BEAUJARDIERE, O.; RODDY, P. A.; HUNTON, D. E.; BALLENTHIN, J. O.; HAIRSTON, M. R. Generation and characteristics of equatorial plasma bubbles detected by the C/NOFS satellite near the sunset terminator. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. A11, 2012. Doi: 10.1029/2012ja018163.
- HUANG, C. S.; LA BEAUJARDIÈRE, O.; RODDY, P. A.; HUNTON, D. E.; BALLENTHIN, J. O.; HAIRSTON, M. R.; PFAFF, R. F. Large-scale quasiperiodic plasma bubbles: C/NOFS observations and causal mechanism. **Journal of Geophysical Research**, v. 118, n. 6, p. 3602–3612, 2013. Doi: 10.1002/jgra.50338.

HUBA, J. D.; LIU, H. L. Global modeling of equatorial spread with SAMI3/WACCM-X. **Geophysical Research Letters**, v. 47, e2020GL088258, 2020. Doi: 10.1029/2020GL088258.

HUDSON, M. K.; KENNEL, C. F. Linear theory of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 34, p. 4581–4590, 1975. Doi: 10.1029/ja080i034p04581.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **MGEX data & products**. 2017. Disponível em: https://igs.org/mgex/data-products/#orbit_clock. Acesso em: 22 jul. 2023.

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, n. 11, p. 2596–2600, 2006. Doi:10.1016/j.asr.2005.07.043.

JAKOWSKI, N.; BORRIES, C.; WILKEN, V. Introducing a disturbance ionosphere index. **Radio Science**, v. 47, n. 4, 2012a. Doi:10.1029/2011rs004939.

JAKOWSKI, N.; BÉNIGUEL, Y.; DE FRANCESCHI, G.; PAJARES, M. H.; JACOBSEN, K. S.; STANISLAWSKA, I.; TOMASIK, L.; WARNANT, R.; WAUTELET, G. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques, **Journal of Space Weather and Space Climate**, v. 2, 2012b. Doi: 10.1051/swsc/2012022.

JAKOWSKI, N.; HOQUE, M. M. Estimation of spatial gradients and temporal variations of the total electron content using ground-based GNSS measurements. **Space Weather**, v. 17, p. 339–356, 2019. Doi:10.1029/2018SW002119.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. **Understanding GPS: principles and applications**. 2.ed. Norwood: Artech House, 2006. 723 p.

KELLEY, M. C.; MAKELA, J. J.; PAXTON, L. J.; KAMALABADI, F.; COMBERIATE, J. M.; KIL, H. The first coordinated ground- and space-based optical observations of equatorial plasma bubbles. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 14, 2003. Doi: 10.1029/2003gl017301.

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. 2.ed. London: Academic Press, 2009. 576 p.

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.

KIL, H.; OH, S. J.; PAXTON, L. J.; FANG, T. W. High-resolution vertical ExB drift model derived from ROCSAT-1 data. **Journal of Geophysical Research**, v.114, A10314, 2004. Doi: 10.1029/2009JA014324.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; CARPENTER, L. A. The day-to-day variability in ionospheric electric fields and currents. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 81, n. 16, 1976. Doi: 10.1029/JA081i016p02737.

KOTULAK, K.; ZAKHARENKOVA, I.; KRANKOWSKI, A.; CHERNIAK, I.; WANG, N.; FRON, A. Climatology characteristics of ionospheric irregularities described with GNSS ROTI. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2634, 2020. Doi: 10.3390/rs12162634.

KRALL, J.; HUBA, J. D.; JOYCE, G.; ZALESKAK, S. T. Three-dimensional simulation of equatorial spread-F with meridional wind effects. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 5, p. 1821–1830, 2009. Doi: 10.5194/angeo-27-1821-2009.

LANGLEY, R. B.; TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. Introduction to GNSS. In: TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. (Ed.). **Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. New York: Springer, 2017. p. 3-23.

LEANDRO, R. F. **Precise point positioning with GPS: a new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis**. 2009, 266 p. Thesis (PhD) - University of New Brunswick, Fredericton, Canada, 2009.

LI, J.; MA, G.; MARUYAMA, T.; WAN, Q.; FAN, J.; ZHANG, J.; WANG, X. ROTI Keograms based on CMONOC to characterize the ionospheric irregularities in 2014. **Earth, Planets and Space**, v. 74, n. 1, e149, 2022. Doi:10.1186/s40623-022-01708-0.

LIU, L.; ZHAO, B.; WAN, W.; NING, B.; ZHANG, M. L.; HE, M. Seasonal variations of the ionospheric electron densities retrieved from Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate mission radio occultation measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, A02302, 2009. Doi: 10.1029/2008JA013819.

LOMOTÉY, S. O. **Temporal and longitudinal climatological studies of the Equatorial Ionization Anomaly as observed by ground-based GNSS receiver networks over South America**. 2021. 183 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

LU, G.; RICHMOND, A. D.; EMERY, B. A.; ROBLE, R. G. Magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling: effect of neutral winds on energy transfer and field-aligned current. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. A10, p. 19,643-19,659, 1995. Doi: 10.1029/95JA00766.

MAKELA, J. J.; VADAS, S. L.; MURYANTO, R.; DULY, T.; CROWLEY, G. Periodic spacing between consecutive equatorial plasma bubbles. **Geophysical Research Letters, Space Sciences**, v. 37, n. 14, L14103, 2010. Doi: 10.1029/2010GL043968.

MARTINIS, C.; BAUMGARDNER, J.; WROTEN, J.; MENDILLO, M. All-sky-imaging capabilities for ionospheric space weather research using geomagnetic conjugate point observing sites. **Advances in Space Research**, v. 61, n. 7, p. 1636–1651, 2018. Doi: 10.1016/j.asr.2017.07.021.

MARUYAMA, T.; MATUURA, N. Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. A12, e10903, 1984. Doi: 10.1029/ja089ia12p10903.

MARUYAMA, T. A diagnostic model for equatorial spread F. 1. Model description and application to electric field and neutral wind effects. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. A12, e14611, 1988. Doi: 10.1029/ja093ia12p14611.

MATZKA, J.; STOLLE, C.; YAMAZAKI, Y.; BRONKALLA, O.; MORSCHHAUSER, A. The Geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity. **Space Weather**, v. 19, n. 5, e2020SW002641, 2021. Doi: 10.1029/2020SW002641.

MELBOURNE, W. G. The case for ranging in GPS based geodetic systems. In: GOAD, C. (Ed.). **Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System**. Rockville: US Department of Commerce, 1985.

MENDILLO, M.; TYLER, A., Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, n.577, 1983. Doi: 10.1029/JA088iA07p05778.

MENDILLO, M.; SULTAN, P. J.; PI, X.; TSUNODA, R. Onset conditions for equatorial spread f. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A9, p. 13865-13876, 1992. Doi: 10.1029/92JA00647.

MENDOZA, L. P. O.; MEZA, A. M.; ARAGÓN PAZ, J. M. A multi-GNSS, multi-frequency and near real-time ionospheric TEC monitoring system for South America. **Space Weather**, 2019a. Doi: 10.1029/2019sw002187.

MENDOZA, L. P. O.; MEZA, A. M.; ARAGÓN PAZ, J. M. Technical note on the multi-GNSS, multi-frequency and near real-time ionospheric TEC monitoring system for South America. **EarthArXiv**, 2019b. Doi: 10.31223/osf.io/3vts6.

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

NISCHAN, T. **GFZRNX-RINEX GNSS data conversion and manipulation toolbox (Version 1.05)**. [S.l.]: GFZ Data Services2, 2016. Doi: 10.5880/GFZ.1.1.2016.002.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **About the solar flux data**. 2015. Disponível em: <https://ngdc.noaa.gov/stp/space-weather>. Acesso em: 21 ago. 2023.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Solar cycle progression**. 2023. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>. Acesso em: 21 ago. 2023.

NOGUEIRA, P. A. B.; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; BAILEY, G. J.; BATISTA, I. S.; SHUME, E. B.; DENARDINI, C. M. Longitudinal variation in Global Navigation Satellite Systems TEC and topside ion density over South American sector associated with the four-peaked wave structures. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 12, p. 7940–7953, 2013. Doi:10.1002/2013ja019266.

NOGUEIRA, P. A. B. **Estudos 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/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

NOONAN, A. L. **Flight plan generation for Unmanned Aerial Vehicles**. 2007. 71 p. M.Sc. Thesis (Master in Mechanical and Nuclear Engineering) - Kansas State University, Manhattan, 2007.

ODIJK, D. **Fast precise positioning in the presence of ionospheric delays**. 2002. 266p. Thesis (PhD in Geosciences) - Delft University of Technology, Delft, 2002.

OLIVEIRA, C. B.; ESPEJO, T. M. S.; MORAES, A.; COSTA, E.; SOUSASANTOS, J.; LOURENÇO, L. F. D.; ABDU, M. A. Analysis of plasma bubble signatures in total electron content maps of the low-latitude ionosphere: a simplified methodology. **Surveys in Geophysics**, v. 41, p. 897–931, 2020. Doi: 10.1007/s10712-020-09584-7.

PARKER, E. N. The formation of sunspots from the solar toroidal field. **Astrophysical Journal**, v.121, e491507, 1955. Doi: 10.1086/146010.

PARKINSON, B. W.; SPILKER, J. J. **Global Positioning System: theory and applications**. Reston: AIAA, 1996.

PALMROTH, M.; LAAKSO, H.; FEJER, B. G.; PFAFF, R. F. DE 2 observations of morningside and eveningside plasma density depletions in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. A8, p. 18429–18442, 2000. Doi: 10.1029/1999ja005090.

PATIL, A. S.; NADE, D. P.; TAORI, A.; PAWAR, R. P.; PAWAR, S. M.; NIKTE, S. S.; PAWAR, S. D. A brief review of equatorial plasma bubbles. **Space Science Reviews**, v. 219, n.16, 2023. Doi: 10.1007/s11214-023-00958-y.

PAULINO, I.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; SOBRAL, J. H. A.; GOBBI, D. Plasma bubble zonal drift characteristics observed by airglow images over Brazilian tropical region. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 29, n. 2, p.239–246, 2011. Doi: 10.1590/S0102-261X2011000200003.

PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 18, p. 2283–2286, 1997. Doi: 10.1029/97GL02273.

PICANÇO, G. A. S. **Desenvolvimento e análise de um índice ionosférico baseado em dados de Conteúdo Eletrônico Total**. 2019. 190 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

PICANÇO, G. A. S.; DENARDINI, C. M.; NOGUEIRA, P. A. B.; BARBOSA-NETO, P. F.; RESENDE, L. C. A.; CARMO, C. S.; HERNANDEZ, E. R.; CHEN, S. S.; MORO, J.; SILVA, R. P. Evaluation of the non-perturbed TEC reference of a new version of the DIX. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 38, n. 3, p. 1-10, 2020. Doi: 10.22564/rbgf.v38i3.2056.

PICANÇO, G. A. S.; DENARDINI, C. M.; NOGUEIRA, P. A. B.; BARBOSA-NETO, P. F.; RESENDE, L.C.A.; CHEN, S. S.; CARMO, C. S.; MORO, J.; ROMERO-HERNANDEZ, E.; SILVA, R.P. Equatorial ionospheric response to storm-time electric fields during two intense geomagnetic storms over the Brazilian region using a Disturbance Ionosphere indeX. **Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics**, v. 223, e105734, 20201. Doi: 10.1016/j.jastp.2021.105734.

PICANÇO, G. A. S.; DENARDINI, C. M.; NOGUEIRA, P. A. B.; RESENDE, L. C. A.; CARMO, C. S.; CHEN, S. S.; BARBOSA-NETO, P. F.; ROMERO-HERNANDEZ, E. Study of the equatorial and low-latitude total electron content response to plasma bubbles during solar cycle 24–25 over the Brazilian region using a Disturbance Ionosphere indeX. **Annales Geophysicae**, v.40, p. 503-517, 2022. Doi: 10.5194/angeo-40-503-2022.

PIMENTA, A. A.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A.; SAHAI, Y.; GOBBI, D.; MEDEIROS, A. F.; TAYLOR, M. J.; TAKAHASHI, H. Ionospheric plasma bubble zonal drift: a methodology using OI 630 nm all-sky imaging systems. **Advances in Space Research**, v. 27, n. 6/7, p. 1219-1224, 2001. Doi: 10.1016/S0273-1177(01)00201-0.

PIMENTA, A.; BITTENCOURT, J.; FAGUNDES, P.; SAHAI, Y.; BURITI, R.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J. Ionospheric plasma bubble zonal drifts over the tropical region: a study using oi 630nm emission all-sky images. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 10, p. 1117–1126, 2003. Doi: 10.1016/S1364-6826(03)00149-4.

PROL, F. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa da tendência diferencial do código nos receptores GNSS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, p.735-749, 2014. Doi: 10.1590/S1982-21702014000400042.

PROL, F. D. S.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; MUELLA, M. T. A. H.; CAMARGO, P. O. Tomographic imaging of ionospheric plasma bubbles based on GNSS and radio occultation measurements. **Remote Sensing**, v. 10, n.10, e1529, 2018. Doi: 10.3390/rs10101529.

RASTOGI, R. G.; MULLEN, J. P.; MACKENZIE, E. Effect of geomagnetic activity on equatorial radio VHF scintillations and spread F. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A5, e3661, 1981. Doi: 10.1029/ja086ia05p03661.

- REINISCH, B.W. New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. **Radio Science**, v.21, n. 3, p. 331-341, 1986. Doi: 10.1029/RS021i003p00331.
- RESENDE, L. C. A.; DENARDINI, C. M.; PICANÇO, G. A. S.; MORO, J.; BARROS, D.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; SILVA, R. P. On developing a new ionospheric plasma index for Brazilian equatorial F region irregularities, **Annales Geophysicae**, v. 37, p. 807–818, 2019. Doi: 10.5194/angeo-37-807-2019.
- REVNIVYKH, S.; BOLKUNOV, A.; SERDYUKOV, A. GLONASS. In: TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. (Ed.). **Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. New York: Springer, 2017. p. 219-243.
- RISHBETH, H. The equatorial F-layer: progress and puzzles. **Annales Geophysicae**, v. 18, p. 730–739, 2000. Doi: 10.1007/s00585-000-0730-6.
- ROMERO, I. **RINEX: the receiver independent exchange format version 4.00**. 2021. Disponível em: https://files.igs.org/pub/data/format/rinex_4.00.pdf. Acesso em: 7 jun. 2023.
- RÖTTGER, J. Wave-like structures of large-scale equatorial spread-F irregularities. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 35, n. 6, p. 1195–1206, 1973. Doi: 10.1016/0021-9169(73)90016-0.
- RAN, C. Development of the BeiDou navigation satellite system. In: DAVIS, L. A.; ENGE, P. K.; GAO, G. X. (Ed.). **Global navigation satellite systems**. Washington: National Academies Press, 2012. p 83-94.
- REN, X.; ZHANG, X.; XIE, W.; ZHANG, K.; YUAN, Y.; LI, X. Global ionospheric modelling using multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS. **Scientific Reports**, v. 6, e33499, 2016. Doi: 10.1038/srep33499.
- RESENDE, L. C. A.; DENARDINI, C. M.; PICANÇO, G. A. S.; MORO, J.; BARROS, D.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; SILVA, R. P.: On developing a new ionospheric plasma index for Brazilian equatorial F region irregularities, **Annales Geophysicae**, v. 37, p.807–818, 2019. Doi: 10.5194/angeo-37-807-2019.
- RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. Introduction to ionospheric physics. **IEEE Transactions on Image Processing**, 1969.
- RISHBETH, H. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region. **Planetary and Space Science**, v. 19, n. 3, p. 357–369, 1971. Doi: 10.1016/0032-0633(71)90098-5.
- RISHBETH, H. The equatorial F-layer: progress and puzzles. **Annales Geophysicae**, v.18, p. 730–739, 2000. Doi: 10.1007/s00585-000-0730-6.
- ROHRBAUGH, R. P.; HANSON, W. B.; TINSLEY, B. A.; CRAGIN, B. L.; MCCLURE, J. P. Images of transequatorial Bubbles based on field-aligned airglow observations from Haleakela in 1984-1986, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 94, e6737, 1989. Doi: 10.1016/S0273-1177(01)00200-9.

- ROMERO, I. **The receiver independent exchange format version 4.00**. 2021. Disponível em: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex305.pdf>.. Acesso em: 19 maio 2023.
- ROSS, W.; ERAMLEY, E. Tilts in the Ionosphere. **Nature**, v.164, p. 355–356, 1949. Doi: 10.1038/164355a0.
- SAGAWA, E.; IMMEL, T. J.; FREY, H. U.; MENDE, S. B. Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.110, A11302, 2005. Doi: 10.1029/2004JA010848
- SAHA, S.; PALLAMRAJU, D.; GHODPAGE, R. N. Investigations of equatorial plasma bubbles as observed in the OI 630 nm nightglow emissions over off-equatorial and low-latitudinal locations over Indian longitudes. **Advances in Space Research**, v. 70, n. 11, p. 3686-3698, 2022. Doi: 10.1016/j.asr.2022.08.023.
- SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, n. 15, p.1377–1383, 2000. Doi: 10.1016/s1364-6826(00)00179-6.
- SANTOS, A. M.; ABDU, M. A.; SOBRAL, J. H. A.; MASCARENHAS, M.; NOGUEIRA, P. A. B. Equatorial evening prereversal vertical drift dependence on solar EUV flux and F10.7 index during quiet and disturbed periods over Brazil. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, p. 4662–4671, 2013. Doi:10.1002/jgra.50438.
- SANTOS, A. M.; BRUM, C. G. M.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; CHEN, S. S.; DENARDINI, C. M.; JESUS, R.; VENKATESH, K.; NOGUEIRA, P. A. B. Anomalous responses of the F2 layer over the Brazilian equatorial sector during a counter electrojet event: a case study. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 127, e2022JA030584, 2022. Doi: 10.1029/2022JA030584.
- SAPUCCI, L. F. Evaluation of modeling water-vapor-weighted mean tropospheric temperature for GNSS-integrated water vapor estimates in Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 3, p. 715–730, 2014. Doi:10.1175/jamc-d-13-048.1.
- SCHAER, S. **Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system**. 1999. 232 p. Thesis (PhD in Natural Sciences) - University of Bern, Bern, Switzerland, 1999.
- SIMON, M. K.; OMURA, J. K.; SCHOLTZ, R. A.; LEVITT, B. K. **Spread spectrum communications**. Rockville: Computer Science Press, 1985. 378 p.

SINGH, S.; BAMGBOYE, D. K.; MCCLURE, J. P.; JOHNSON, F. S. Morphology of equatorial plasma bubbles. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A9, p. 20019–20029, 1997a. Doi: 10.1029/97JA01724.

SINGH, S.; BAMGBOYE, D. K.; MCCLURE, J. P.; JOHNSON, F. S. Morphology of equatorial plasma bubbles. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A9, p. 20019–20029, 1997b. Doi: 10.1029/97ja01724.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; ZAMLUTTI, C. J. Wave disturbances in the low latitude ionosphere and equatorial ionospheric plasma depletions. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A3, e1374, 1981. Doi: 10.1029/ja086ia03p01374.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; PAULA, E. R.; ZAMLUTTI, C. J.; BORBA, G. L. A Study of the ionospheric plasma bubbles climatology over Brazil, based on 22 Years (1977–1998) of OI 630 nm airglow observation. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12/14, p.1517–1524, 2002. Doi: 10.1016/S1364-6826(02)00089-5.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; PEDERSEN, T. R.; CASTILHO, V. M.; ARRUDA, D. C. S.; MUELLA, M. T. A. H. Ionospheric zonal velocities at conjugate points over Brazil during the COPEX campaign: experimental observations and theoretical validations. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. A4, 2009. Doi: 10.1029/2008ja013896.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; PEDERSEN, T. R.; CASTILHO, V. M.; ARRUDA, D. C. S.; MUELLA, M. T. A. H.; BATISTA, I. S.; MASCARENHAS, M.; PAULA, E. R.; KINTNER, P. M.; KHERANI, E. A.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; SCHUCH, N. J.; DENARDINI, C. M.; ZAMLUTTI, C. J.; PIMENTA, A. A.; SOUZA, J. R.; BERTONI, F. C. P. Ionospheric zonal velocities at conjugate points over Brazil during the COPEX campaign: Experimental observations and theoretical validations, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, A04309, 2009. Doi:10.1029/2008JA013896.

SOUSASANTOS, J.; KHERANI, E. A.; SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; MORAES, A. O.; OLIVEIRA, C. B. A. A numerical study on the 3-D approach of the equatorial plasma bubble seeded by the prereversal vertical drift. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.124, p. 4539–4555, 2019. Doi: 10.1029/2018JA026239.

SPITS, J. **Total electron content reconstruction using triple frequency GNSS signals**. 2012. 196 p. Thesis (PhD) - University of Liège, Liège, Belgium, 2012.

SUBIRANA, J. S.; ZORNOZA, J. M. J.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M. **Detector based in code and carrier phase data: The Melbourne-Wübbena combination**. 2013. Disponível em: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Detector_based_in_code_and_carrier_phase_data:The_Melbourne-W%C3%BCbena_combination.. Acesso em: 10 jul. 2023.

SULTAN, P. J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research**, v.101, n. A12, p. 26875–26891, 1996. Doi: 10.1029/96ja00682.

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; OTSUKA, Y.; IVO, A.; PAULINO, I.; MEDEIROS, A. F.; DENARDINI, C. M.; SANT'ANNA, N.; SHIOKAWA, K. Plasma bubble monitoring by TEC map and 630 nm airglow image. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 130/131, p.151-158, 2015. Doi: 10.1016/j.jastp.2015.06.003.

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C.; DENARDINI, C.; PÁDUA, M.; 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. Doi: 10.1002/2016SW001474.

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; BARROS, D.; ABDU, M. A.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K. Equatorial plasma bubble seeding by MSTIDs in the ionosphere. **Progress in Earth and Planetary Science**, v. 5, n. 32, 2018. Doi: 10.1186/s40645-018-0189-2.

TANG, L.; LOUIS, O. P.; CHEN, W.; CHEN, M. A ROTI-aided equatorial plasma bubbles detection method. **Remote Sensing**, v. 13, e 4356, 2021. Doi: 10.3390/rs13214356.

TAORI, A.; PARIHAR, N.; GHODPAGE, R.; DASHORA, N.; SRIPATHI, S.; KHERANI, E. A.; PATIL, P. T. Probing the possible trigger mechanisms of an equatorial plasma bubble event based on multistation optical data. **Journal of Geophysical Research**, v. 120, n. 10, p. 8835–8847, 2015. Doi: 10.1002/2015ja021541.

TSUNODA, R.T. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in the integrated E region Pedersen conductivity, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 90, p. 447-456, 1985. Doi: 10.1029/JA090iA01p00447.

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, São José dos Campos, 2015.

VANZANDT, T. E.; CLARK, W. L.; WARNOCK, J. M. Magnetic apex coordinates: a magnetic coordinate system for the ionospheric F2 layer, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 77, p. 2406–2411, 1972. Doi: 10.1029/JA077i013p02406.

VAQUERO-MARTÍNEZ, J.; ANTÓN, M.; ORTIZ DE GALISTEO, J. P.; ROMÁN, R.; CACHORRO, V. E.; MATEOS, D. Comparison of integrated water vapor from GNSS and radiosounding at four GRUAN stations. **Science of The Total Environment**, 2018. Doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.1.

- VARGAS, F.; BRUM, C.; TERRA, P.; GOBBI, D. Mean zonal drift velocities of plasma bubbles estimated from keograms of nightglow all-sky images from the Brazilian sector. **Atmosphere**, v. 11, n. 69, 2020. Doi:10.3390/atmos11010069.
- WAN, X.; XIONG, C.; RODRIGUEZ-ZULUAGA, J.; KERVALISHVILI, G. N.; STOLLE, C.; WANG, H. Climatology of the occurrence rate and amplitudes of local time distinguished equatorial plasma depletions observed by Swarm satellite. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 123, p. 3014–3026, 2018. Doi: 10.1002/2017JA025072.
- WANG, Y.; ZHAO, L.; GAO, Y. Estimation and analysis of GNSS Differential Code Biases (DCBs) using a multi-spacing software receiver. **Sensors**, v. 21, n. 2, p. 1-17, 2021. Doi:10.3390/s21020443.
- WANNINGER, L. The occurrence of ionospheric disturbances above Japan and their effects on precise GPS positioning. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT CRUSTAL MOVEMENTS, 8., 1993, Kobe. **Proceedings...** Geodetic Society of Japan, 1993. p.175–179.
- WATANABE, S.; OYA, H. Occurrence characteristics of low latitude ionosphere irregularities observed by impedance probe on board the Hinotori satellite. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 38, n. 2, p. 125–149, 1986. Doi: 10.5636/jgg.38.125.
- WAUTELET, G.; HUBERT, B.; GÉRARD, J. C.; IMMEL, T. J. The OI-135.6 nm nighttime emission in ICON-FUV 1 images: a new tool for the observation of classical medium-scale traveling ionospheric disturbances. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, p. 7670–7686, 2019. Doi: 10.1029/2019JA026930.
- WIENS, R. H.; LEDVINA, B. M.; KINTNER, P. M.; AFEWERKI, M.; MULUGHETA, Z. Equatorial plasma bubbles in the ionosphere over Eritrea: occurrence and drift speed. **Annales Geophysicae**, v. 24, p. 1443–1453, 2006. Doi: 10.5194/angeo-24-1443-2006.
- WILKEN, V.; KRIEGEL, M.; JAKOWSKI, N.; BERDERMANN, J. An ionospheric index suitable for estimating the degree of ionospheric perturbations. **Journal of Space Weather and Space Climate**, v. 8, n. A19, 2018. Doi:10.1051/swsc/2018008.
- WOODMAN, R. F. Vertical drift velocities and east–west electric fields at the magnetic equator. **Journal of Geophysical Research**, v.75, p. 6249-6259, 1970.
- WOODMAN, R. F., LA HOZ, C. Radar observations of F region equatorial irregularities. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, n. 31, p. 5447–5466, 1976. Doi: 10.1029/JA081i031p05447.

WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; BARROS, D.; TAKAHASHI, H.; CARRASCO, A. J.; VITAL, L. F. R.; REZENDE, L. C. A.; EGITO, F.; ROSA, G. M.; SAMPAIO, A. H. R. Interaction between Equatorial Plasma Bubbles and a Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance, observed by OI 630 nm airglow imaging at Bom Jesus de Lapa, Brazil. **Earth and Planetary Physics**, v. 5, n. 5, p. 397–406, 2021. Doi: 10.26464/epp2021045.

WÜBBENA, G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements. In: GOAD, C. (Ed.). **Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System**. Rockville: US Department of Commerce, 1985.

YAMAZAKI, Y.; YUMOTO, K.; CARDINAL, M. G.; FRASER, B. J.; HATTORI, P.; KAKINAMI, Y.; LIU, J. Y.; LYNN, K. J. W.; MARSHALL, R.; MCNAMARA, D.; NAGATSUMA, T.; NIKIFOROV, V. M.; OTADOY, R. E.; RUHIMAT, M.; SHEVTSOV, B. M.; SHIOKAWA, K.; ABE, S.; UOZUMI, T.; YOSHIKAWA, A. An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 116, A10312, 2011. Doi: 10.1029/2011JA016487.

YANG, Y.; TANG, J.; MONTENBRUCK, O. Chinese Navigation Satellite Systems. In: TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. (Ed.). **Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. New York: Springer, 2017. p. 273-304.

ZALESK, S. T.; HUBA, J. D. Effect of meridional winds on the development of equatorial spread F. **Eos Transactions American Geophysical Union**, v.72, n. 17, 1991.

ZHANG, X.; LIU, L.; LIU, S. Dependence of thermospheric zonal winds on solar flux, geomagnetic activity, and hemisphere as measured by CHAMP, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.122, p. 8893–8914, 2017. Doi: 10.1002/2016JA023715.

ZHANG, R.; TU, R.; LIU, J.; HONG, J.; FAN, L.; ZHANG, P.; LU, X. Performance of Galileo: global coverage, precise orbit determination, and precise positioning. **Advances in Space Research**, v. 64, p. 299–313, 2019. Doi: 10.1016/j.asr.2019.03.042.

ANEXO A – LISTA DE ESTAÇÕES GNSS DISPONÍVEIS

Tabela A.1 – Lista de estações GNSS disponíveis (1-50).

#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)	#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)
1	25MA	-67,7156	-37,7719	26	ARP7	-97,0583	27,8382
2	3ARO	-60,2742	-38,3821	27	ATJN	-70,1361	-19,3009
3	ABCC	-74,1263	4,6614	28	AUTF	-68,3024	-54,8395
4	ABMF	-61,5275	16,2623	29	AZU1	-117,8959	34,126
5	ABPW	-73,9946	4,6898	30	AZUL	-59,8813	-36,767
6	ABRA	-65,6973	-22,722	31	ALMA	-35,7765	-9,5547
7	ACPI	-79,9493	9,3713	32	BABJ	-43,5471	-13,2615
8	AEDA	-70,1772	-20,5463	33	BABR	-44,9942	-12,1501
9	AGCA	-73,5949	8,3152	34	BAIL	-39,1724	-14,7966
10	AGGO	-58,1392	-34,8736	35	BAIR	-41,8585	-11,3056
11	ALAR	-36,6534	-9,7492	36	BAIT	-40,2892	-12,5213
12	AMBC	-62,9263	-0,9693	37	BATF	-39,7433	-17,5549
13	AMCO	-65,3333	-4,872	38	BAVC	-40,8027	-14,8883
14	AMHA	-63,0278	-7,5167	39	BAVE	-70,7647	-34,1675
15	AMMU	-57,708	-3,3966	40	BEJA	-73,8751	7,0608
16	AMPR	-56,7343	-2,6312	41	BELE	-48,4625	-1,4088
17	AMTA	-69,9349	-4,2235	42	BEPA	-48,4408	-1,4608
18	AMTE	-64,7067	-3,3457	43	BGGY	-61,8607	17,0454
19	AMUA	-60,0176	-3,0918	44	BNGA	-73,1232	7,105
20	ANGO	-72,6909	-37,7959	45	BOAV	-60,7011	2,8452
21	ANTC	-71,5313	-37,3385	46	BOGA	-74,0793	4,6388
22	APLJ	-52,5152	-0,8218	47	BOGT	-74,0809	4,6401
23	APS1	-51,1665	-0,0595	48	BORC	-44,7398	-60,7396
24	ARCA	-70,7580	7,0845	49	BOSC	-73,8858	9,9669
25	AREQ	-71,4923	-16,4655	50	BRAZ	-47,8779	-15,9475

Tabela A.2 – Lista de estações GNSS disponíveis (51-112).

#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)	#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)
51	BRFT	-38,4250	-3,8775	82	CLLA	-69,3560	-20,9546
52	BRMU	-64,6956	32,3704	83	CN05	-68,3588	18,564
53	BTON	-71,4870	-30,2627	84	CN06	-70,6556	18,7898
54	BYSP	-66,1606	18,4079	85	CN09	-72,1393	19,6873
55	CHAC	-58,9589	-27,4203	86	CN12	-76,7485	18,0047
56	MCLA	-70,2469	-22,7457	87	CN13	-74,5332	24,0654
57	CRIS	-70,3862	-24,1679	88	CN15	-78,6924	26,5568
58	VALL	-70,7638	-28,572	89	CN19	-70,0480	12,6119
59	CALI	-76,5319	3,3759	90	CN23	-88,7784	17,2606
60	CALL	-77,1472	-12,0629	91	CN27	-69,9393	19,6673
61	CASI	-75,1995	7,9889	92	CN40	-68,9575	12,1801
62	CATA	-65,7741	-28,471	93	CNBA	-71,4571	-31,398
63	CBAA	-68,4477	-22,7465	94	CNC0	-86,8203	21,1747
64	CCHR	-72,5902	-47,2533	95	CONS	-72,4113	-35,3307
65	CDLC	-69,7609	-22,1897	96	CORD	-64,4700	-31,5284
66	CEEU	-38,4255	-3,8775	97	CORU	-57,6291	-19,0001
67	CEFE	-40,3195	-20,3108	98	COYQ	-71,8913	-45,5142
68	CEFT	-38,4725	-3,7107	99	CRAT	-39,4156	-7,238
69	CESB	-40,3375	-3,6813	100	CRLR	-68,9363	18,4167
70	CGTC	-70,0683	-20,1773	101	CRO1	-64,5838	17,757
71	CHAC	-58,9589	-27,4203	102	CRZL	-71,4091	-29,1019
72	CHDA	-70,6086	-33,9892	103	CSJ1	-68,4265	-31,9805
73	CHET	-88,2986	18,4952	104	CSLO	-69,3014	-31,7849
74	CHIM	-66,1465	-39,1637	105	CSOM	-69,2230	-52,7805
75	CHLT	-72,8847	-49,3403	106	CTLR	-70,0964	-21,964
76	CHMA	-70,2769	-37,374	107	CTPC	-71,2966	-32,561
77	CHOY	-60,0194	-34,8981	108	CUIB	-56,0699	-15,5553
78	CHPI	-44,9845	-22,6874	109	CURR	-72,0036	-40,2297
79	CHYT	-70,3415	-18,3708	110	DGF1	-70,6600	-33,4600
80	CIFU	-70,6462	-25,6525	111	DINO	-67,8426	-30,1633
81	CLL1	-72,0795	-36,5952	112	DORA	-74,6627	5,4540

Tabela A.3 – Lista de estações GNSS disponíveis (113-174).

#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)	#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)
113	DORE	-57,6810	-36,3151	144	HMBS	-69,8851	-20,2788
114	EBYP	-55,8914	-27,3693	145	IACR	-70,3323	-18,4797
115	EESC	-47,8992	-22,0049	146	IBAG	-75,2142	4,4283
116	EMAT	-71,6618	-31,1464	147	ICAM	-90,5275	19,8535
117	EPSF	-60,6723	-31,6395	148	IFSC	-48,5421	-27,5944
118	ESQU	-71,3234	-42,9171	149	IGM1	-58,4393	-34,5722
119	FALK	-57,8733	-51,6938	150	ILHA	-51,3428	-20,4278
120	FEDE	-58,7830	-30,9535	151	ILOC	-72,1781	-34,9485
121	FFT2	-61,0632	14,6019	152	IMBT	-48,6550	-28,2347
122	FLRS	-31,1257	39,4541	153	IMCH	-73,8845	-38,4114
123	FMYR	-81,8634	26,591	154	IMPZ	-47,4972	-5,4918
124	FOSA	-58,1703	-26,1912	155	INEG	-102,2840	21,856
125	FUNC	-16,9070	32,6479	156	IPAZ	-110,3300	24,1452
126	FUTF	-71,8479	-43,1908	157	IQQE	-70,1311	-20,2736
127	GARA	-73,3595	5,0816	158	IRSC	-71,5690	-52,8575
128	GCEA	-81,3780	19,293	159	ISPA	-109,3438	-27,1249
129	GERD	-62,1937	16,7947	160	ITAI	-54,5878	-25,4206
130	GGUA	-59,3132	-33,1508	161	JBAL	-65,6221	-27,5847
131	GGUE	-74,7593	9,2401	162	JCHL	-68,7463	-30,2426
132	GLPS	-90,3035	-0,743	163	JME2	-72,5378	18,2352
133	GOGY	-49,2547	-16,6647	164	JRGN	-70,5744	-23,289
134	GOLD	-116,8889	35,4251	165	JUNT	-70,0936	-29,9762
135	GOUR	-49,1430	-14,5093	166	JVGO	-64,1249	-25,1197
136	GRIS	90,0000	63,5915	167	KEPA	-36,5132	-54,2947
137	GRLS	-68,3159	-31,6063	168	KOUG	-52,6389	5,0985
138	GTA1	-70,1802	-20,5658	169	KOUR	-52,8060	5,2522
139	GUAT	-90,5202	14,5904	170	LARJ	-66,8518	-29,4134
140	GUAY	-59,0262	-31,8691	171	LETA	-69,9425	-4,2142
141	GVIL	-63,0130	-35,0326	172	LHOR	-71,2968	-29,5761
142	HLN2	-71,9295	-35,0098	173	LLCH	-71,0809	-28,1906
143	HLPN	-73,1894	-36,7479	174	LMMF	-60,9962	14,5948

Tabela A.4 – Lista de estações GNSS disponíveis (175-236).

#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)	#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)
175	LNCM	-73,6275	-42,2149	206	MSCG	-54,5407	-20,4409
176	LNQM	-71,3612	-38,4553	207	MSDR	-54,9304	-22,1941
177	LPAL	-17,8935	28,7639	208	MSNV	-54,1914	-23,022
178	LPGS	-57,9323	-34,9067	209	MSPP	-55,6083	-22,6214
179	LSCH	-71,2456	-29,9083	210	MTCN	-52,2714	-13,5558
180	LVEG	-70,5311	19,2227	211	MTCO	-55,4563	-10,8039
181	LVIL	-71,5131	-31,9096	212	MTGA	-52,3114	-15,8752
182	MA01	-68,0564	-38,9513	213	MTIT	-54,1490	-17,2182
183	MABA	-49,1223	-5,3624	214	MTJI	-58,7236	-11,4487
184	MABB	-44,8152	-4,2409	215	MTLA	-59,3498	-15,2283
185	MABS	-46,0397	-7,5338	216	MTLE	-54,2817	-15,5537
186	MANA	-86,2490	12,1489	217	MTNX	-52,3487	-14,6976
187	MAUL	-70,8206	-35,8094	218	MTSF	-50,6635	-11,6193
188	MAW1	62,8713	-67,605	219	MTV2	-56,1757	-34,9135
189	MBIO	-56,6221	-64,2403	220	MTY2	-100,3124	25,7157
190	MCL1	-43,8816	-16,7198	221	MUER	-73,4705	-41,4055
191	MDO1	-104,0145	30,6804	222	MZAE	-68,1495	-33,2552
192	MEDE	-75,5783	6,1996	223	MZAU	-69,1178	-33,736
193	MELK	-73,7489	-43,8969	224	MZGA	-67,6962	-34,9784
194	MERI	-89,6197	20,9802	225	MZRF	-68,3307	-34,6123
195	MGBH	-43,9249	-19,9419	226	NAPL	-81,7754	26,1487
196	MGIN	-46,3280	-22,3186	227	NAS0	-77,4617	25,0523
197	MGMC	-43,8583	-16,7164	228	NAUS	-60,0550	-3,0229
198	MGMT	-47,5233	-18,7241	229	NEIA	-47,9250	-25,0202
199	MGRP	-46,1326	-19,2099	230	NESA	-64,4532	-40,1049
200	MGUB	-48,2560	-18,9192	231	NEVA	-75,2925	2,9373
201	MGUE	-69,3979	-35,7774	232	NGAQ	-60,7286	-26,686
202	MGV1	-45,4350	-21,5426	233	NOYA	-59,7949	-32,3837
203	MPR1	-105,2487	20,6788	234	NUGA	-65,2566	-35,113
204	MRCG	-69,1296	-26,8356	235	NWBL	-62,2020	16,8203
205	MSAQ	-55,6706	-20,4529	236	OAFA	-68,6226	-31,5087

Tabela A.5 – Lista de estações GNSS disponíveis (237-298).

#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)	#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)
237	OHI2	-57,9013	-63,3211	268	PELL	-72,6047	-35,8277
238	OHI3	-57,9014	-63,3211	269	PEPE	-40,5061	-9,3844
239	ONRJ	-43,2243	-22,8957	270	PERA	-75,6889	4,7926
240	OSOR	-73,1036	-40,5972	271	PFRJ	-71,6346	-30,6742
241	OVLL	-71,2030	-30,6035	272	PGLL	-72,3446	-39,6324
242	OXPE	-97,0746	15,8889	273	PICC	-69,3341	-20,4899
243	OXTH	-95,2402	16,2864	274	PICR	-45,1726	-10,4302
244	OXUM	-96,4984	15,6624	275	PIE1	-108,1184	34,3014
245	P780	-66,5791	18,075	276	PIFL	-43,0412	-6,7881
246	PAAR	-52,2122	-3,2116	277	PISR	-42,7021	-9,0307
247	PAAT	-52,1808	-3,2011	278	PITN	-42,7930	-5,1025
248	PAIT	-56,0364	-4,2877	279	PLO5	-117,2428	32,6651
249	PAJA	-72,1266	-40,6613	280	PLVP	-73,5845	-37,1487
250	PALM	-64,0507	-64,775	281	PNAT	-72,5027	-51,6794
251	PARC	-70,8792	-53,1371	282	POAL	-51,1198	-30,074
252	PASM	-54,7286	-2,4278	283	POLI	-46,7303	-23,5556
253	PATA	-62,9894	-40,7967	284	POVE	-63,8963	-8,7093
254	PATH	-70,1520	-20,8207	285	PPTE	-51,4085	-22,1199
255	PBCG	-35,9071	-7,2137	286	PPTG	-61,5315	16,2245
256	PBJP	-34,8734	-7,1363	287	PRCV	-53,4663	-24,9628
257	PCCL	-70,1060	-18,4578	288	PRGU	-51,4876	-25,384
258	PCHA	-69,4324	-19,8689	289	PRMA	-51,9384	-23,4097
259	PCLM	-71,9997	-34,3869	290	PRMI	-67,0447	17,9703
260	PCMU	-71,9609	-34,4956	291	PRSN	-67,1442	18,2174
261	PDEL	-25,6621	37,7477	292	PSTO	-77,2765	1,2119
262	PEAF	-37,6314	-7,7641	293	PTAR	-71,0492	-53,155
263	PEBA	-60,5625	-33,9458	294	PTRB	-123,0185	37,9957
264	PECL	-73,6502	-37,6867	295	PTRE	-69,5737	-18,1946
265	PEDR	-70,6883	-30,8387	296	PTRO	-72,4021	-41,1382
266	PEJO	-61,8940	-35,8066	297	PUMO	-84,9662	10,0645
267	OAX2	-96,7166	17,0783	298	PCVA	-71,6228	-30,2674

Tabela A.6 – Lista de estações GNSS disponíveis (299-360).

#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)	#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)
299	PWIL	-67,6297	-54,9319	330	RSAL	-55,7688	-29,7894
300	QLLN	-73,6637	-43,114	331	RSCL	-54,7541	-28,1417
301	QSEC	-85,3567	9,8405	332	RSPE	-52,4176	-31,8024
302	QTAY	-71,7014	-33,1927	333	RSPF	-52,3900	-28,2280
303	QUIB	-76,6561	5,6998	334	RWSN	-65,1072	-43,2989
304	RABT	-6,8535	33,9981	335	SAAV	-73,3820	-38,7916
305	RASF	-61,4706	-31,2479	336	SAGA	-67,0578	-0,1439
306	RCHY	-62,1526	16,7041	337	SAJA	-59,9280	-30,5746
307	RCRU	-73,1799	-39,6667	338	SALU	-44,2120	-2,5934
308	RCSD	-71,6126	-33,6542	339	SAMA	-74,1865	11,2254
309	RDMC	-71,6383	19,8489	340	SANT	-70,6680	-33,1503
310	RDSB	-69,9108	18,4616	341	SAVO	-38,4323	-12,9392
311	RDSJ	-71,2264	18,8196	342	SBAL	-61,2266	-30,3088
312	RECF	-34,9508	-8,0509	343	SBLL	-70,7801	-34,7917
313	RECO	-59,6644	-29,1464	344	SCAQ	-48,7374	-26,3938
314	RGDG	-67,7509	-53,7854	345	SCCH	-52,5995	-27,1376
315	RIO2	-67,7511	-53,7855	346	SCFL	-48,5195	-27,5994
316	RIOB	-67,8024	-9,9655	347	SCLA	-50,3043	-27,7928
317	RIOD	-43,3063	-22,8178	348	SCRZ	-63,1597	-17,7968
318	RIOP	-78,6495	-1,6501	349	SCTB	166,7572	-77,8492
319	RJCG	-41,3262	-21,7649	350	SCUB	-75,7623	20,0121
320	RMBA	-72,9524	-43,7754	351	SEAJ	-37,1043	-10,9296
321	RNMO	-37,3255	-5,2042	352	SILL	-70,7379	-29,2546
322	RNNA	-35,2077	-5,8361	353	SINC	-75,3871	9,3158
323	RNPF	-38,2061	-6,1317	354	SJAV	-71,7317	-35,5951
324	ROB1	-71,015	-32,9758	355	SJRP	-49,3593	-20,7855
325	ROCD	-60,5439	-13,1223	356	SJSP	-45,8617	-23,2071
326	RODE	-69,1309	-30,2094	357	SL01	-66,3140	-33,1564
327	ROGM	-65,3306	-10,7842	358	SLMC	-70,9619	-31,7767
328	ROJI	-61,9597	-10,8639	359	SMAR	-53,7160	-29,7188
329	ROSA	-52,9513	-22,5234	360	SNSN	-75,3079	5,7153

Tabela A.7 – Lista de estações GNSS disponíveis (361-422).

#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)	#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)
361	SPAR	-50,4392	-21,1846	392	TNMZ	-104,4011	19,1233
362	SPBO	-48,4318	-22,8524	393	TNSJ	-96,489	16,1726
363	SPBP	-46,5337	-22,9254	394	TNTB	-109,0523	25,6055
364	SPC1	-47,0627	-22,8163	395	TNTM	-113,6311	31,3356
365	SPDR	-51,5534	-21,4617	396	TOGU	-49,0491	-11,7467
366	SPED	-69,3049	18,4609	397	TOPL	-48,3307	-10,1711
367	SPFE	-50,2283	-20,2629	398	TPYU	-72,6474	-44,4205
368	SPFR	-47,3859	-20,5108	399	TRNC	-65,2822	-26,2302
369	SPJA	-48,2867	-21,2411	400	TRPD	-71,6466	-33,0228
370	SPLI	-49,7329	-21,6653	401	TRST	-70,2738	-28,837
371	SPPI	-47,6236	-22,7030	402	TRTL	-73,5401	-47,8034
372	SPRZ	-56,9948	-63,3953	403	TTAL	-70,4254	-25,4207
373	SPS1	-47,4177	-23,479	404	TTUW	-61,3985	10,6397
374	SPTU	-50,4915	-21,9292	405	TUC1	-65,1957	-26,8327
375	SSA1	-38,5165	-12,9752	406	TUCU	-65,2295	-26,8428
376	SSIA	-89,1166	13,6971	407	TUMA	-78,7299	1,8225
377	STHL	-5,6700	-15,9400	408	TUNA	-73,3632	5,5315
378	SUAR	-61,9313	-37,4585	409	TXGA	-94,772	29,3277
379	SURY	-62,6543	-29,1412	410	TXLN	-97,3001	26,0947
380	SVIC	-54,4875	-26,9937	411	TXRP	-97,0484	28,0619
381	TAMP	-97,8641	22,2789	412	UAGU	-102,3143	21,9187
382	TAMR	-70,2341	-27,5941	413	UAIB	-70,5087	-33,4932
383	TAVA	-65,7092	-26,853	414	UAPE	-70,1408	-20,2431
384	TERO	-64,256	-27,7893	415	UBA1	-45,1189	-23,5002
385	TGMX	-86,8674	20,868	416	UBE1	-48,317	-18,8895
386	THTI	-149,6057	-17,5771	417	UCOE	-101,6939	19,8133
387	TILC	-65,3951	-23,5771	418	UCOR	-64,1927	-31,4348
388	TLGT	-70,988	-33,776	419	UDAT	-70,3537	-27,3575
389	TMCO	-72,6132	-38,7652	420	UDEC	-72,3443	-37,4722
390	TNAL	-98,6547	19,1189	421	UFPR	-49,231	-25,4484
391	TNBA	-113,5469	28,9721	422	UNPA	-69,2076	-51,6482

Tabela A.8 – Lista de estações GNSS disponíveis (423-469).

#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)	#	Código	Lon. (°)	Lat. (°)
423	UNPM	-86,8677	20,8684	454	VBCA	-62,2692	-38,7008
424	UNRO	-60,6284	-32,9594	455	VICO	-42,87	-20,7615
425	UNSA	-65,4076	-24,7275	456	VIKH	-64,7977	17,7166
426	UNSJ	-68,5771	-31,5413	457	VIMA	-63,2415	-32,42
427	UTAR	-70,2960	-18,4905	458	VITA	-72,8639	-36,4233
428	UTON	-98,3158	19,0336	459	VITH	-64,9685	18,3433
429	UXAL	-96,9241	19,5165	460	VLZL	-69,9642	-23,1172
430	UYAR	-56,4907	-30,4117	461	VOHG	-72,5562	-48,4646
431	UYBA	-58,9025	-62,1845	462	VTIS	-118,2935	33,7125
432	UYCL	-54,214	-32,3657	463	XPLO	-73,194	-46,4841
433	UYCO	-57,8354	-34,463	464	YCBA	-63,6793	-22,0171
434	UYDU	-55,6024	-33,3159	465	YEBE	-3,088	40,5253
435	UYFD	-56,1894	-34,0967	466	YEMA	-61,2358	-24,2808
436	UYFS	-56,8869	-33,516	467	ZAPA	-71,4647	-32,5525
437	UYIF	-55,9327	-34,946	468	ZARZ	-76,0669	4,3967
438	UYLA	-55,2488	-34,3628	469	ZSU4	-65,9928	18,4313
439	UYLP	-54,1421	-34,6557				
440	UYMO	-56,2599	-34,8883				
441	UYPA	-58,0672	-32,2912				
442	UYPT	-56,5098	-32,8006				
443	UYRI	-55,5591	-30,8958				
444	UYRO	-53,5548	-34,001				
445	UYRV	-54,6881	-31,7724				
446	UYSA	-57,9598	-31,3752				
447	UYSG	-55,8436	-32,6174				
448	UYSJ	-56,7091	-34,3237				
449	UYSO	-58,0136	-33,2613				
450	UYTA	-55,9375	-31,6831				
451	UYTD	-57,5245	-30,9463				
452	UYTT	-54,3804	-33,2413				
453	VALN	-71,6342	-33,0277				

