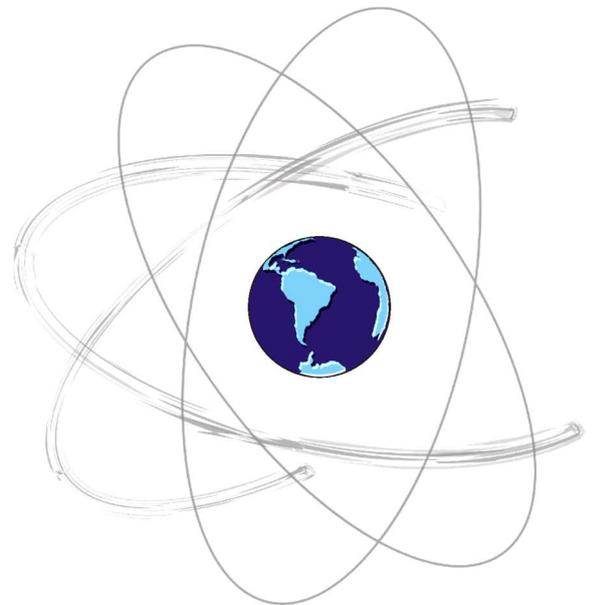


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Campus de Presidente Prudente
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

GABRIEL OLIVEIRA JEREZ

**ESTIMATIVA E ANÁLISE DE PERFIS DE DENSIDADE DE ELÉTRONS PARA A
REGIÃO BRASILEIRA: INTEGRAÇÃO DE RÁDIO OCULTAÇÃO GNSS E DE
INFORMAÇÕES IONOSFÉRICAS PROVENIENTES DE ESTAÇÕES GNSS
TERRESTRES**



PRESIDENTE PRUDENTE

2021

GABRIEL OLIVEIRA JEREZ

**ESTIMATIVA E ANÁLISE DE PERFIS DE DENSIDADE DE ELÉTRONS PARA A
REGIÃO BRASILEIRA: INTEGRAÇÃO DE RÁDIO OCULTAÇÃO GNSS E DE
INFORMAÇÕES IONOSFÉRICAS PROVENIENTES DE ESTAÇÕES GNSS
TERRESTRES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas.

Orientadora: Dra. Daniele Barroca Marra Alves

Coorientadores: Dr. João Francisco Galera Monico

Dr. Manuel Hernández-Pajares

PRESIDENTE PRUDENTE

2021

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente

J54e Jerez, Gabriel Oliveira
Estimativa e análise de perfis de densidade de elétrons para a região brasileira : integração de rádio ocultação GNSS e de informações ionosféricas provenientes de estações GNSS terrestres / Gabriel Oliveira Jerez. – Presidente Prudente, 2021
189 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2021
Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves
Coorientadores: João Francisco Galera Monico, Manuel Hernández-Pajares

1. Rádio ocultação. 2. Recuperação de perfis de densidade de elétrons. 3. Mapas ionosféricos. I. Alves, Daniela Barroca Marra. II. Monico, João Francisco Galera. III. Hernández-Pajares, Manuel. IV. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. V. Título.

Alessandra Kuba Oshiro Assunção
CRB-8/9013

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Estimativa e análise de perfis de densidade de elétrons para a região brasileira: integração de rádio ocultação GNSS e de informações ionosféricas provenientes de estações GNSS terrestres

AUTOR: GABRIEL OLIVEIRA JEREZ

ORIENTADORA: DANIELE BARROCA MARRA ALVES

COORIENTADOR: JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO

COORIENTADOR: MANUEL HERNANDEZ PAJARES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES (Participação Virtual)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. CRISTIANO MAX WRASSE (Participação Virtual)
Divisão de Clima Espacial / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. FELIPE GEREMIA NIEVINSKI (Participação Virtual)
Departamento de Geodésia / Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. FABRICIO DOS SANTOS PROL (Participação Virtual)
Institute for Solar-Terrestrial Physics / German Aerospace Center (DLR)

Prof. Dr. FRANCISCO JAVIER AZPILICUETA (Participação Virtual)
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas / Universidad Nacional de La Plata

Presidente Prudente, 08 de outubro de 2021

DADOS CURRICULARES

Gabriel Oliveira Jerez

Nascimento	23/02/1990 – Presidente Prudente – SP
Filiação	Pedro Ângelo Jerez Ortiz Iara Maria Correia de Oliveira
2010 - 2014	Graduação Bacharelado em Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP
2015 - 2017	Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP
2017 - 2021	Pós-Graduação Doutorado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

À minha família, em especial aos meus pais, Iara e Pedro, aos meus irmãos, Mateus, Felipe e Ana, e à minha sobrinha, Helena, que em um ano tão difícil renovou nossas esperanças em um futuro melhor e cheio de amor.

AGRADECIMENTOS

"Chegar para agradecer e louvar o ventre que me gerou, o orixá que me tomou, a mão da doçura que consagrou.

Louvar a água da minha terra, o chão que me sustenta, o palco, o massapê, a beira do abismo, o punhal do susto de cada dia.

Agradecer as nuvens que logo são chuva, sereniza os sentidos e ensina a vida a reviver.

Agradecer os amigos que fiz e que mantêm a coragem de gostar de mim, apesar de mim.

Agradecer a alegria das crianças, as borboletas dos meus quintais reais ou não.

A cada folha, a toda raiz, as pedras majestosas e também aquelas pequeninas como eu.

Agradecer o Sol, que raia o dia e a Lua, que, como o menino deus, espria luz e vira meus sonhos de pernas para o ar.

Agradecer as marés altas e também aquelas que levam para outros costados todos os males.

Agradecer a tudo que canta livre no ar, dentro do mato, sobre o mar.

As vozes que soam de cordas tênues e partem cristais.

Agradecer aos senhores, que acolhem e aplaudem esse milagre.

Agradecer ter o que agradecer, louvar e abraçar."

Maria Bethânia

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, processo nº 88882.433954/2019-01, com financiamento de bolsa de estudos também no âmbito do Programa Capes-PrInt, processo nº 88887.310463/2018-00, mobilidade nº 88887.370704/2019-00.

Agradeço à UNESP (Universidade Estadual Paulista), minha casa nos últimos doze anos, pela formação, pela estrutura oferecida, por todas as oportunidades proporcionadas e por todos os futuros construídos. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, em específico aos professores e demais profissionais ligados ao mesmo. Aos centros nacionais e internacionais pela disponibilização de dados, em especial agradeço à UCAR (*University Corporation for Atmospheric Research*), ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), à UPC (*Universitat Politècnica de Catalunya*), ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), ao DGFI-TUM (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut - Technische Universität München*), ao IGS (*International GNSS Service*) e ao projeto INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) (Processo CNPq: 465548/2014-2) e Políticas Públicas (Processo FAPESP: 2017/50115-0) “Tecnologia GNSS no suporte à Navegação Aérea”.

Ao meu coorientador, Galera, pela vasta e inquieta experiência compartilhada. Ao meu coorientador, Manuel, que, em um ano muito atípico, tão generosamente me recebeu na UPC e muito contribuiu para a realização deste trabalho, com grandes doses de conhecimento, bom humor, humanidade e humildade. Em especial, agradeço muito à minha orientadora, Daniele, pela parceria que já completa nove anos, pela confiança,

generosidade e exemplo profissional de sempre. Na pesquisa aprendemos a questionar tudo, mas uma certeza que pude ter nos últimos anos foi a de estar em boas mãos.

Agradeço aos membros da banca, Cristiano Max Wrasse, Felipe Geremia Nievinski, Francisco Javier Azpilicueta e Fabricio dos Santos Prol, por aceitarem o convite e por todas as contribuições e sugestões para a presente tese e trabalhos futuros.

Aos parceiros que contribuíram diretamente no desenvolvimento deste projeto, com discussões, fornecimento de dados ou auxílio nos diferentes ambientes computacionais e linguagens de programação que foram necessários, em especial agradeço ao Prol, ao Andreas e ao Mateus. Aos membros do GEGE (Grupo de Estudos de Geodésia Espacial) pelas discussões. Aos participantes do grupo *UPC-IonSAT*, em particular à Haixia, pela receptividade. Aos discentes do PPGCC, em especial Vini, Loram, Marcela, Gui Cardim, Paulo Setti, Tayná e Paulo Sérgio. À Cida e à Zilda, pela dedicação, amizade e carinho com todos. À Cinthia, pela atenção, competência e paciência. A todos os demais colegas de graduação e pós, professores e funcionários do Departamento de Cartografia.

Aos alunos das turmas XXXVIII da Engenharia Cartográfica, LX da Geografia e LVII da Matemática. Primeiro contato que tive como professor universitário, experiência iniciada durante o doutorado e facilitada em muito pela compreensão e empatia dos discentes dessas turmas.

À minha família e amigos, base necessária para a construção de qualquer pessoa ou trabalho. Aos meus pais, Pedro e Iara, por todos os ensinamentos (intencionais ou não), sacrifícios e falta de juízo despendidos na minha criação. Aos meus irmãos Mateus, Felipe e Ana, pela cumplicidade na vida, no dia a dia, na criação de nossos pais e na manutenção da união da nossa família. Aos meus cunhados, Junior e Ana Paula, e sobrinhos (por ordem de nascimento) Cecília Fernanda, Clara, Conrado e Helena. Vocês são meu porto seguro.

Nesses anos tive a sorte de encontrar amigos que se tornaram parte da minha família. Dani e Fer, primeiros a mostrar que nossa família podia ter ainda mais irmãos. Ju, uma das pessoas mais essenciais na minha vida. Jéssica, irmã mais nova que tem atitude de irmã mais velha sempre que preciso. Carioca, prova de que eu não preciso entender completamente uma pessoa para a amar e querer sempre por perto. Mari, minha cúmplice e uma das minhas maiores companheiras. Samara, parceria em pessoa. Cris, pela garra que tem, por todas as conversas e pelo apoio de sempre. Bozena, uma das melhores e mais fortes pessoas que conheço. À grade amiga Selminha, por tanto anos de amizade e por ser um exemplo tão grande de força. Ao Michael, grata surpresa que Barcelona me trouxe, uma das amizades mais imediatas que tive a sorte de encontrar. Ao Andreas, pela inesperada e muito bem-vinda

amizade. À Daiane pelas discussões sem conclusões e discordâncias aparentemente eternas. Lê Ferrari, Lê Rosim e Lucas do Prado, pelo alívio no dia a dia, pelas comemorações extremas, mesmo as sem motivo aparente, e por sempre me acompanharem independentemente de onde eu esteja. Érico, Simone e Raquel, com quem tive relativamente pouco tempo de convivência, mas suficiente para fazerem parte essencial da minha vida. Van, Léo, Pablo, Guil e Ana Lúcia, por quem sou muito grato à UNESP por ter trazido à minha vida. Luiz Henrique, Simone, Lucas e Fernanda, uma das maiores provas que tive nos últimos tempos de que amizade vai além da presença física. À Clara, ao Elias e suas famílias, pela hospitalidade e carinho comigo. Muitas outras pessoas fizeram parte da minha vida até aqui, em especial agradeço a Renan, Débora, Prol, Géssica, Melina, Lucas De Carli, Juh Farkuh, Arthur, Dri, Janiele, Fabrício, Bruno Teremussi, Bruno Lopes, Daniel, Ivan, João Lucas, Mineiro, Rapha, Nayanna, Rodrigo, André, Diego, Soraia, Steffi, Diogo e Bruno Fernandes.

Agradeço de forma muito especial aos meus fiéis companheiros, Tequila, Brahma, Lola, Nina, Juma, Max, Pepe, Ayza, Maya, Simba, Jairo e Spyke, que também fazem parte da minha família e me ensinam diariamente a urgência de amar.

Por fim, agradeço a todos os professores que passaram pela minha vida e fizeram parte da minha formação. E a todos aqueles que seguem firmes nessa difícil e extremamente necessária profissão. Não percamos a esperança em tempos melhores e não nos esqueçamos que, para tempos melhores, a educação é o único caminho. Educar e resistir. “O sol há de brilhar mais uma vez, a luz há de chegar aos corações” (Clara Nunes).

“More than machinery we need humanity. More than cleverness we need kindness and gentleness. Without these qualities, life will be violent, and all will be lost.”

Charles Chaplin, The Great Dictator (1940)

RESUMO

A rádio ocultação começou a ser utilizada para a sondagem da atmosfera de outros planetas na década de sessenta. Com o desenvolvimento dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*) e de missões com satélites de baixa órbita (LEO - *Low Earth Orbiting*) surgiram novas possibilidades de investigações da atmosfera terrestre, entre elas a aplicação da técnica de rádio ocultação (RO) GNSS. A influência devido à atmosfera terrestre sofrida pelo sinal transmitido pelo satélite GNSS permite a recuperação dos índices de refração, os quais possuem informações da composição atmosférica. A inversa de Abel é comumente empregada para a recuperação de perfis, porém, para sua aplicação é imposta a condição de simetria esférica da atmosfera. Com isso a técnica tem seu desempenho degradado para alguns casos como, por exemplo, na recuperação de perfis de densidade de elétrons, principalmente em regiões com elevada variabilidade da densidade eletrônica. Visando melhores resultados diversas pesquisas vêm propondo abordagens alternativas. Dentre essas, a utilização da inversa de Abel com o auxílio de mapas ionosféricos se mostrou promissora, no entanto, algumas limitações foram observadas, especialmente em regiões com maior variabilidade na distribuição de elétrons, como é o caso do Brasil. Neste contexto, essa pesquisa teve por objetivo desenvolver uma metodologia para realizar a recuperação de perfis de densidade de elétrons utilizando dados de RO empregando a inversa de Abel com o auxílio de mapas ionosféricos e informações ionosféricas regionais. A metodologia desenvolvida foi implementada no software utilizado pela *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR) para processamento dos dados da missão *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate* (COSMIC) e de outras missões. Para o desenvolvimento da metodologia foram realizadas diversas avaliações de mapas ionosféricos disponíveis para a região brasileira, considerando produtos regionais, globais e híbridos. Foi proposta uma nova metodologia de avaliação de mapas ionosféricos por meio de ionossondas, sendo os produtos CODG e UQRG os que apresentaram os melhores resultados entre os produtos analisados. Além disso, foi realizada uma avaliação do impacto do uso das incertezas do Conteúdo Total de Elétrons na Vertical (VTEC - *Vertical Total Electron Content*) no domínio da ionosfera e do posicionamento. O uso das incertezas dos mapas ionosféricos não influenciou significativamente a interpolação dos valores de VTEC, porém, no domínio do posicionamento o impacto do uso das incertezas ficou evidenciado, principalmente para estações em regiões com maior variabilidade da densidade de elétrons em períodos de intenso fluxo solar. As metodologias de recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir de RO foram testadas considerando mapas globais e comparadas com o desempenho de outros produtos COSMIC. As avaliações consideraram medidas *in situ* e dados de ionossondas. Com as avaliações com medidas *in situ* o produto proposto obteve melhor desempenho no cenário de baixo fluxo solar, enquanto para dois cenários de intenso fluxo solar o produto oficial COSMIC (*ionPrf*) obteve melhores resultados. Para as avaliações com dados de ionossondas o produto derivado da metodologia proposta obteve melhor desempenho considerando as ocultações com ocorrência mais próxima das ionossondas de referência (janelas de busca mais restritas).

Palavras-chave: Rádio ocultação; recuperação de perfis de densidade de elétrons; mapas ionosféricos.

ABSTRACT

Radio occultation has been used for probing the atmosphere of other planets since the sixties. With the development of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Low Earth Orbiting (LEO) satellite missions, new possibilities for investigating the Earth's atmosphere have emerged, including the use of the GNSS radio occultation (RO) technique. The influence due to the Earth's atmosphere suffered by the transmitted signal allows the retrieval of refraction indices, which carry information about the atmospheric composition. The Abel inversion is commonly employed for profiles retrieval, however, for its application it is imposed that the atmosphere is spherically symmetric. Thus, the technique has its performance degraded in some cases, as for instance, in the electron density profiles retrieval, mainly in regions with high variability of the electron density. To overcome this issue, several studies have been proposing alternative approaches. Among those, the use of the Abel inversion aided by ionospheric maps has shown promising results, however, some limitations have been observed, especially in regions with greater variability in the electron distribution, as the Brazilian region. In this context, this research aimed to develop a methodology to perform the electron density profiles retrieval using RO data, employing the Abel inversion aided by ionospheric maps and regional ionospheric information. The developed methodology was implemented in the software used by the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) for processing data from the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate (COSMIC) mission and other missions. For the development of the methodology, several evaluations of ionospheric maps available for the Brazilian were performed, considering regional, global and hybrid products. A new methodology was proposed for the assessment of ionospheric maps by means of ionosonde data, with the products CODG and UQRG presenting the best results among the analyzed products. Furthermore, an evaluation of the impact of the use of Vertical Total Electron Content (VTEC) uncertainties in the ionospheric and positioning domain was performed. The use of the uncertainties of the ionospheric maps did not significantly influence the interpolation of the VTEC values, however, in the positioning domain the impact of the use of the uncertainties was evidenced, mainly for stations in regions with higher ionospheric variability in periods of high solar flux. The profile retrieval methodologies were tested considering global maps and compared with the performance of other COSMIC products. The evaluations considered *in situ* measurements and ionosonde data. With the assessment with *in situ* measurements, the proposed product performed better in the low solar flux scenario, while for two high solar flux scenarios the official COSMIC product (ionPrf) led to better results. For the evaluations with ionosonde data the product derived from the proposed methodology obtained better performance considering the occultations with occurrence closer to the reference ionosondes (more restricted search windows).

Key words: Radio occultation; electron density profiles retrieval; ionospheric maps.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Missões <i>Mariner IV</i> (a) e <i>Mariner V</i> (b).....	31
Figura 2 – Satélites das missões COSMIC (a) e COSMIC-2 (b).	35
Figura 3 – Constelações das missões COSMIC (a) e COSMIC-2 (b).....	35
Figura 4 – Satélites gêmeos das missões GRACE (a) e GRACE-FO (b).	36
Figura 5 – Perfis típicos de temperatura da atmosfera (a) e de densidade elétrons da ionosfera (b) em relação às camadas atmosféricas.....	39
Figura 6 – Geometria de uma ocultação GNSS.....	41
Figura 7 – Elementos da geometria da ocultação GNSS necessários para a derivação do ângulo de refração (α).	42
Figura 8 – Triângulos decompostos da geometria da ocultação para os satélites LEO (a) e GNSS (b).	44
Figura 9 – Geometria do TEC considerado na ocultação.	50
Figura 10 – Projeção da variação horizontal da densidade de elétrons considerando as camadas atmosféricas.	53
Figura 11 – Ilustração da origem dos dados do mapa OTRG, a partir dos dados do mapa OTHR (vermelho) e OTHG (azul).	60
Figura 12 - Localização das ionossondas utilizadas.....	63
Figura 13 – Comparação entre foF ₂ medida com ionossondas e valores de VTEC estimados utilizando os produtos CODG (a e c) e UQRG (b e d).....	64
Figura 14 - RMS das diferenças entre valores de foF ₂ medidos e estimados com auxílio dos GIMs considerando quatro estratégias e uma semana de dados: (a) FZA0M e SAA0K, par de ionossondas com a menor distância; e (b) CAJ2M e BVJ03, par com a maior distância.....	67
Figura 15 – Comparação entre os valores de foF ₂ medidos com as ionossondas e estimados com GIM e os valores de VTEC estimados com GIMs para cada ionossonda com os produtos CODG (a e c) e UQRG (b e d).....	69
Figura 16 – Diferenças entre valores de foF ₂ medidos nas ionossondas e estimados usando GIMs considerando dados de dois pares de ionossondas: (a) FZA0M e SAA0K; e (b) CAJ2M e BVJ03.	71
Figura 17 – Diferença de valores de espessura equivalente da ionosfera considerando dados de dois pares de ionossondas: (a) FZA0M e SAA0K; e (b) CAJ2M e BVJ03.....	71

Figura 18 – Diferença de valores de <i>shape function peak</i> considerando dados de dois pares de ionossondas: (a) FZA0M e SAA0K; e (b) CAJ2M e BVJ03.....	71
Figura 19 – RMS médio das diferenças entre os valores de foF2 medidos com as ionossondas e estimados utilizando GIMs <i>versus</i> as distâncias dos pares de ionossondas, considerando uma semana de dados: (a) semana teste (020-026/2015); (b) período de baixo (166-172/2015); (c) período de elevado (288-294/2015) conteúdo de elétrons na ionosfera.....	72
Figura 20 – RMS médio das diferenças entre os valores de foF2 medidos com as ionossondas e estimados utilizando GIMs <i>versus</i> as distâncias dos pares de ionossondas, considerando uma semana de dados divididos em dois grupos formados por ionossondas em latitudes similares (esquerda) e diferentes (direita): (a) semana teste (020-026/2015); (b) período de baixo (166-172/2015); (c) período de elevado (288-294/2015) conteúdo de elétrons na ionosfera.	73
Figura 21 – Valores de RMS das diferenças entre valores de foF ₂ estimados com auxílio de GIMs e medidos para seis pares de ionossondas considerando 13 GIMs e um ano de dados (2015).	74
Figura 22 –RMS médio das diferenças de valores de foF2 medidos nas ionossondas e estimados utilizando GIMs <i>versus</i> as distâncias entre os pares de ionossondas para um ano de dados (2015).	76
Figura 23 – Valores de RMS das diferenças entre os valores de foF ₂ estimados com auxílio de GIMs e medidos para seis pares de ionossondas considerando dois GIMs (CODG e UQRG) e quatro anos de dados: (a) 2014; (b) 2015; (c) 2016; (d) 2017.	76
Figura 24 – Geometria dos pontos utilizados para a interpolação padrão (a) do VTEC para um dado ponto (azul) e a interpolação usada para a avaliação (b) a partir: dos quatro pontos com mesma geometria de uma interpolação padrão (verde); dos quatro pontos mais próximos (vermelho); e dos oito pontos mais próximos (verde e vermelho).....	82
Figura 25 – Análise considerando seis regiões divididas por latitudes.	83
Figura 26 – Análise considerando quatro regiões específicas.	83
Figura 27 – Valores de VTEC e RMS dos produtos: (a) CODG; (b) UQRG; (c) UQ-6.85	
Figura 28 – Estações GNSS utilizadas nas análises no domínio do posicionamento...	86

Figura 29 – Diferenças dos valores de RMS por seção de latitude com: (a) CODG; (b) UQRG; (c) UQ-6.....	88
Figura 30 – Diferenças dos valores de RMS por região específica com: (a) CODG; (b) UQRG;.....	88
Figura 31 – Erro médio 3D do posicionamento utilizando CODG para as estações: (a) MAPA; (b) SAVO; (c) PPTE; e (d) SMAR.....	90
Figura 32 – VTEC calculado com CODG para o primeiro dia de cada cenário para as posições das estações MAPA, SAVO, PPTE e SMAR.....	90
Figura 33 – RMS do erro 3D usando CODG para as estações: (a) MAPA; (b) SAVO; (c) PPTE; e (d) SMAR.....	91
Figura 34 – Erro médio 3D do posicionamento utilizando: (a) UQRG para estação PPTE; (b) UQRG para estação SMAR; (c) UQ-6 para estação PPTE; e (d) UQ-6 para estação SMAR.....	92
Figura 35 – RMS das diferenças de valores de foF ₂ medidos por ionossondas e estimados com auxílio de mapas ionosféricos e a simples diferença entre os valores das duas ionossondas (<i>off</i>) para dados de 2017: (a) FZA0M-SAA0K; (b) SAA0K-BVJ03; (c) CAJ2M-FZA0M; (d) CAJ2M-SAA0K; (e) FZA0M-BVJ03; e (f) CAJ2M-BVJ03.....	98
Figura 36 – Erro médio 3D do posicionamento utilizando mapas ionosféricos utilizando dados de 2017 para as estações: (a) APMA; (b) SAVO; (c) PPTE; e (d) SMAR.	100
Figura 37 – Erro 3D obtido no posicionamento utilizando mapas ionosféricos para as estações: (a) APMA; e (b) SAVO.....	102
Figura 38 – Erro 3D obtido no posicionamento utilizando mapas ionosféricos para as estações: (a) PPTE; e (b) POAL.....	103
Figura 39 – Número de perfis ionosféricos das missões CHAMP (esquerda), COSMIC (centro) e GRACE (direita) considerando: (a) um dia de dados; (b) um mês de dados; (c) um ano de dados; e (d) missão completa.....	105
Figura 40 – Número de perfis ionosféricos da missão COSMIC considerando células de 1° x 1° (latitude x longitude) para: (a) um ano de dados (2007); e (b) missão completa.....	106
Figura 41 – Número de perfis ionosféricos provenientes de RO das missões CHAMP, COSMIC e GRACE para: (a) mundo; e (b) região brasileira.....	107
Figura 42 – Exemplo de mapas globais com os produtos: (a) <i>ionGrid</i> ; e (b) UQRG.	109

Figura 43 – Visualização das posições dos satélites GPS e LEO e do ponto tangente (PT) no início e no final de uma ocultação.....	110
Figura 44 – Plotagem dos perfis obtidos com todas as metodologias, além dos produtos COSMIC <i>ionPrf</i> e <i>igaPrf</i>	112
Figura 45 – Ilustração da estratégia utilizada para comparação dos valores de densidade de elétrons (Ne) provenientes de RO e da missão GRACE.	114
Figura 46 – Ilustração da estratégia utilizada para comparação dos valores de NmF ₂ provenientes de RO com os provenientes de ionossondas.....	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Missões de RO-GNSS com respectivos períodos de dados disponíveis. ...	32
Quadro 2 – Missões com dados disponibilizados pelo CDAAC.....	34
Quadro 3 – Informações do UQRG e dos produtos finais disponibilizados pelo CDDIS. 58	
Quadro 4 – GIMs utilizados na avaliação.	62
Quadro 5 – Seis combinações possíveis de pares de ionossondas e respectivas distâncias.	63
Quadro 6 – Descrição dos cenários utilizados.....	84
Quadro 7 – GIMs utilizados na avaliação.	96
Quadro 8 – Descrição dos cenários utilizados.....	114

LISTA DE SIGLAS

CAS	<i>Chinese Academy of Science</i>
CDAAC	<i>COSMIC Data Analysis and Archive Center</i>
CDDIS	<i>Crustal Dynamics Data Information System</i>
CHAMP	<i>Challenging Minisatellite Payload</i>
CICERO	<i>Community Initiative for Continuous Earth Remote Observation</i>
C/NOFS	<i>Communications/Navigation Outage Forecasting System</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
COSMIC	<i>Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate</i>
COSPAR	<i>Committee on SPace Research</i>
DCB	<i>Differential Code Bias</i>
<i>DESDynI</i>	<i>Deformation, Ecosystem Structure, and Dynamics of Ice</i>
DGFI-TUM	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut- Technische Universität München</i>
DSAC	<i>Deep Space Atomic Clock</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-range Weather Forecasts</i>
EIA	<i>Equatorial Ionization Anomaly</i>
EMBRACE	<i>Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Especial</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FDE	<i>Fault Detection and Exclusion</i>
<i>Fesat</i>	<i>FEderation SATellite</i>
FSI	<i>Full Spectrum Inversion</i>
FY-3	<i>Feng Yun-3</i>
GIM	<i>Global Ionospheric Map</i>
GLONASS	<i>GLObal NAVigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPS/MET	<i>GPS Meteorology</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery And Climate Experiment</i>
GRACE-FO	<i>GRACE Follow On</i>
IAACs	<i>IGS Ionosphere Associate Analysis Centers</i>

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	<i>International GNSS Service</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONEX	<i>IONosphere EXchange format</i>
IOX	<i>Ionosphere Occultation Experiment</i>
IPP	<i>Ionospheric Pierce Point</i>
IRI	<i>International Reference Ionosphere</i>
Jason-CS	<i>Jason Continuity of Service</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
KOMPSAT-5	<i>Korean Multipurpose Satellite-5</i>
LEO	<i>Low Earth Orbiting</i>
LPIM	<i>La Plata Ionospheric Model</i>
LT	<i>Local Time</i>
MT	<i>Megha-Tropiques</i>
MetOp	<i>Meteorological Operational satellite programme</i>
MetOp-SG	<i>MetOp-Second Generation programme</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
netCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
NRMS	<i>Normalized Root Mean Square</i>
NSPO	<i>National SPace Organization</i>
OPTIMAP	<i>Operational Tool for Ionospheric Mapping And Prediction</i>
NWP	<i>Numerical Weather Prediction - Previsão Numérica do Tempo</i>
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PRISM	<i>Parametrized Real-time Ionospheric Specification Model</i>
PVC	<i>Phase Center Variation</i>
RAIM	<i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RIM	<i>Regional Ionospheric Map</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RO	Rádio Ocultação
ROM SAF	<i>Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facility</i>
SAC-C	<i>Satélite de Aplicaciones Científicas-C</i>

SAC-D	<i>Satélite de Aplicaciones Científicas-D</i>
SIRGAS	<i>Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas</i>
SLM	<i>Single Layer Model</i>
<i>Sunsat</i>	<i>Stellenbosch UNiversity SATellite</i>
STEC	<i>Slant Total Electron Content</i>
<i>TanDEM-X</i>	<i>TerraSAR-X Add-on for Digital Elevation Measurement at X-band</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>TEC Unit</i>
<i>TerraSAR-X</i>	<i>Terra-Synthetic Aperture Radar X-band</i>
TWIM	<i>TaiWan Ionospheric Model</i>
VTEC	<i>Vertical Total Electron Content</i>
UCAR	<i>University Corporation for Atmospheric Research</i>
UNESP	<i>Universidade Estadual Paulista</i>
UNLP	<i>Universidad Nacional de La Plata</i>
URSI	<i>Union Radio-Scientifique Internacionale</i>
UPC	<i>Universitat Politècnica de Catalunya</i>
UT	<i>Universal Time</i>
WHU	<i>Wuhan University</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – RMS médio (MHz) das diferenças entre valores medidos de foF ₂ e estimados com as quatro abordagens apresentadas (considerando GIMs) e a simples diferença entre os valores medidos nas duas ionossondas de cada par (<i>off</i>). Os resultados são correspondentes aos dias 20 a 26 de 2015.	68
Tabela 2 – RMS médio das diferenças entre valores de foF ₂ medidos e estimados com GIMs e a simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas (<i>off</i>) considerando um ano de dados (2015).	75
Tabela 3 – Taxas de melhoria do RMS médio das diferenças entre valores de foF ₂ medidos e estimados com GIMs em relação à simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas considerando um ano de dados (2015).	75
Tabela 4 – RMS médio das diferenças entre valores de foF ₂ medidos e estimados com dois GIMs (CODG e UQRG) e a simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas (<i>off</i>) considerando quatro anos de dados (2014-2017).	77
Tabela 5 – Taxas de melhoria do RMS médio das diferenças entre valores de foF ₂ medidos e estimados com dois GIMs (CODG e UQRG) em relação à simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas considerando quatro anos de dados (2014-2017).	77
Tabela 6 – Média dos erros absolutos obtidos com as interpolações com (GIM _{RMSon}) e sem (GIM _{RMSoff}) o peso baseado nas incertezas e as diferenças entre as duas abordagens para os quatro cenários.	87
Tabela 7 – Média das taxas de melhoria com a utilização do RMS do VTEC por estação e cenário.	93
Tabela 8 – Média das taxas de melhoria com o uso do RMS do VTEC por estação. ...	94
Tabela 9 – Médias dos RMS das diferenças de foF ₂ medidos por ionossondas e estimados com auxílio de mapas ionosféricos e a simples diferença dos entre os valores das duas ionossondas (<i>off</i>).	97
Tabela 10 – Taxas de melhoria dos RMS das diferenças de foF ₂ medidos por ionossondas e estimados com auxílio de mapas ionosféricos em relação à simples diferença dos entre os valores das duas ionossondas.	99
Tabela 11 – Valores médios do erro 3D no posicionamento por estação e produto utilizado.	101

Tabela 12 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 4 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.....	117
Tabela 13 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 2 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.....	118
Tabela 14 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 50 km em altitude e 4 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.....	119
Tabela 15 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 50 km em altitude e 2 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.....	120
Tabela 16 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2014, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.....	125
Tabela 17 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2015, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.....	126
Tabela 18 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2014, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.....	127
Tabela 19 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2015, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.....	128
Tabela 20 – Desempenho geral das metodologias avaliadas para cada cenário considerando as janelas de 05°, 10° e 20°.....	129

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	OBJETIVOS	26
1.2	JUSTIFICATIVA	26
1.3	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES.....	27
1.4	ESTRUTURA DA TESE	28
2	RÁDIO OCULTAÇÃO	30
2.1	HISTÓRICO	30
2.2	PRINCIPAIS MISSÕES DE RO-GNSS	31
2.3	PERSPECTIVAS FUTURAS	34
3	RECUPERAÇÃO DE PERFIS ATMOSFÉRICOS	38
3.1	ESTRUTURA DA ATMOSFERA.....	38
3.2	GEOMETRIA DA RO-GNSS	41
3.3	RECUPERAÇÃO DE PERFIS DE TEMPERATURA E PRESSÃO.....	44
3.4	RECUPERAÇÃO DE PERFIS DE DENSIDADE DE ELÉTRONS.....	46
3.4.1	<i>Abordagem clássica</i>	<i>46</i>
3.4.2	<i>Abordagens alternativas</i>	<i>51</i>
4	MAPAS IONOSFÉRICOS E SUA QUALIDADE NA REGIÃO BRASILEIRA	56
4.1	MAPAS DISPONÍVEIS	57
4.1.1	<i>Mapas globais</i>	<i>57</i>
4.1.2	<i>Mapas regionais.....</i>	<i>58</i>
4.1.3	<i>Mapas híbridos.....</i>	<i>59</i>
4.2	AVALIAÇÃO DE MAPAS IONOSFÉRICOS.....	60
4.2.1	<i>Metodologia.....</i>	<i>62</i>
4.2.2	<i>Resultados e análises</i>	<i>66</i>
4.2.3	<i>Considerações sobre a avaliação de mapas ionosféricos</i>	<i>78</i>
4.3	INTERPOLAÇÃO DE MAPAS IONOSFÉRICOS	79
4.3.1	<i>Metodologia.....</i>	<i>80</i>
4.3.2	<i>Resultados e análises</i>	<i>86</i>
4.3.3	<i>Considerações sobre o uso de incertezas do VTEC.....</i>	<i>94</i>
4.4	MAPAS GLOBAIS VS MAPAS REGIONAIS.....	95
4.4.1	<i>Metodologia.....</i>	<i>95</i>
4.4.2	<i>Resultados e análises</i>	<i>96</i>
5	PERFIS DE DENSIDADE DE ELÉTRONS PROVENIENTES DE RO.....	104
5.1	ANÁLISE DA COBERTURA DE DADOS DE RO	104
5.2	METODOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE PERFIS IONOSFÉRICOS.....	107
5.2.1	<i>Metodologia utilizada no GMRIION (CDAAC).....</i>	<i>107</i>
5.2.2	<i>Proposta com auxílio de mapas ionosféricos.....</i>	<i>109</i>
5.3	AVALIAÇÃO COM MEDIÇÕES <i>IN SITU</i>	113
5.3.1	<i>Metodologia.....</i>	<i>113</i>
5.3.2	<i>Resultados e análises</i>	<i>115</i>
5.4	AVALIAÇÃO COM MEDIÇÕES DE IONOSSONDA.....	121
5.4.1	<i>Metodologia.....</i>	<i>121</i>
5.4.2	<i>Resultados e análises</i>	<i>122</i>
5.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO.....	129

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	131
	REFERÊNCIAS	135
	APÊNDICE A – INVERSA DE ABEL	148
	APÊNDICE B – INFORMAÇÕES DAS MISSÕES DE RO.....	149
	APÊNDICE C – PRODUTOS DISPONÍVEIS DA MISSÃO COSMIC	150
	APÊNDICE D – FERRAMENTAS PARA RECUPERAÇÃO DE PERFIS DE RO.....	152
	APÊNDICE E – RESULTADOS IN SITU.....	164
	APÊNDICE F – RESULTADOS COM IONOSSONDAS.....	172
	APÊNDICE G – RESULTADOS RELATIVOS COM IONOSSONDAS.....	180
	APÊNDICE H – AVALIAÇÃO CONSIDERANDO MAPAS HÍBRIDOS	184
	APÊNDICE I – TRABALHOS DESENVOLVIDOS.....	186

1 INTRODUÇÃO

A ocultação, fenômeno pelo qual um corpo celeste deixa de ser visto em razão da sobreposição de outro, começou a fazer parte de missões para exploração e sondagem de atmosferas planetárias na década de 1960 (FJELDBO e ESHLEMAN, 1968; 1969). Com o advento do GPS (*Global Positioning System*) e das missões com satélites LEO (*Low Earth Orbiting*), a técnica de rádio ocultação (RO) se tornou uma importante ferramenta para investigações da atmosfera terrestre.

Em 1995 foi lançada a missão GPS/MET (*GPS-Meteorology*) com o objetivo de provar o conceito da técnica de RO por GNSS e, desde então, diversas missões foram desenvolvidas incluindo receptores para RO. Uma das mais recentes foi a missão COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*), lançada como missão experimental, mas que resultou em dados operacionais. Devido ao sucesso da missão original, atualmente está em operação a missão COSMIC-2. Além de proporcionar melhor cobertura da região equatorial, os satélites da nova missão coletam, não apenas dados da constelação GPS, mas também das constelações GLONASS (*GLObal Navigation Satellite System*) e Galileo (COSMIC, 2021).

O lançamento de novas constelações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e LEO com receptores de RO aumenta consideravelmente a quantidade e o potencial de aplicações da técnica em diversas áreas, como Meteorologia, Aeronomia e Geodésia. A RO pode ser empregada, por exemplo, na *Numerical Weather Prediction* (NWP - Previsão Numérica do Tempo), na detecção de mudanças climáticas, prevenção de desastres naturais, recuperação do conteúdo total de elétrons (*Total Electron Content - TEC*), entre outros (HAJJ *et al.*, 2002).

A RO por GNSS parte do princípio de que os sinais enviados pelos satélites GNSS e recebidos nos satélites LEO sofrem os efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera ao atravessarem essas camadas, afetando a fase e a amplitude dos sinais (KURSINSKI *et al.*, 2000). A refração sofrida pela propagação do sinal permite o cálculo dos índices de refração, que possuem diversas informações da composição da atmosfera terrestre. A partir desses índices é possível extrair, por exemplo, perfis de umidade, pressão, temperatura e densidade de elétrons (KURSINSKI *et al.*, 2000; HAJJ *et al.*, 2002).

Um método comumente empregado para a recuperação dos índices de refração é a inversa de Abel¹, que em geral assume simetria esférica da atmosfera. Com isso, a técnica pode levar a perfis menos acurados principalmente quando se considera a recuperação de perfis de densidade de elétrons. Essa generalização é ainda mais problemática quando são consideradas regiões com grande variação no gradiente horizontal da densidade de elétrons (YUE *et al.*, 2010; SHAIKH, NOTARPIETRO e NAVA, 2014), como é o caso do Brasil. Isso foi verificado em diversas investigações como Garcia-Fernandez *et al.* (2005), Wu *et al.* (2009), Yue *et al.* (2010) e Yue, Schreiner e Kuo (2012; 2013).

Em Hernández-Pajares, Juan e Sanz (2000) foi proposta a utilização de dados de estações terrestres de receptores GNSS para estimar os valores de VTEC para auxiliar a inversa de Abel clássica. Neste trabalho foi utilizada uma função para converter o valor de VTEC em densidade de elétrons e introduzir essas informações para representar a variabilidade horizontal da ionosfera. A metodologia proposta teve continuidade com Garcia-Fernandez *et al.* (2003; 2005), sendo aplicada para dados das missões GPS/MET, CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*) e SAC-C (*Satélite de Aplicaciones Científicas-C*). Nesses trabalhos foi observado um melhor desempenho com o método proposto em relação ao método tradicional.

Uma das abordagens mais investigadas nos últimos anos é a recuperação dos perfis de densidade de elétrons com a inversa de Abel auxiliada por dados suplementares. Yue, Schreiner e Kuo (2013) apresentam um método para a recuperação auxiliada por mapas globais ionosféricos² (*Global Ionospheric Maps - GIMs*). Neste estudo foi verificado que a inversa de Abel pode ser melhorada significativamente com auxílio de mapas globais, se comparado com a inversa de Abel padrão. No entanto, constatou-se que a precisão dos resultados deste método está diretamente ligada à qualidade do GIM utilizado, sendo recomendada a utilização de mapas mais acurados, por exemplo, a partir da densificação das redes de estações com receptores GNSS (YUE, SCHREINER e KUO, 2013).

Mais recentemente Shao *et al.* (2018) apresentaram um estudo da influência da resolução dos GIMs utilizados na recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir de dados de RO. Em regiões com densas redes de receptores GNSS, como a Europa, o método apresentado levou a resultados promissores. Porém, é destacado no trabalho que em regiões com redes menos densas o método proposto não apresenta o mesmo desempenho. Além disso,

¹ A inversa de Abel foi a solução proposta em 1825 pelo matemático norueguês Niels Henrik Abel para um formato específico de equação integral. Mais detalhes da inversão da equação são apresentados no Apêndice A. Fonte: Tricomi (1985) e Bracewell (1986).

² Mapas ionosféricos neste caso se referem a *grids* de valores de VTEC ou, em alguns casos específicos, de NmF₂.

cabe ressaltar que, além de a Europa possuir uma rede mais densa de estações, a região apresenta variação da distribuição na densidade de elétrons mais regular do que a observada em regiões como a equatorial.

Outros trabalhos buscaram fontes alternativas de dados para fornecer informações sobre a componente horizontal da ionosfera. Guo *et al.* (2015) apresentam uma comparação da versão clássica da inversa de Abel com duas abordagens: uma auxiliada por um modelo derivado de observações de RO e outra pelo *International Reference Ionosphere*³ (IRI). Ambas apresentaram melhoria em relação ao método em que é considerada a atmosfera esfericamente simétrica, porém, limitações foram observadas principalmente em regiões com alta variação do gradiente horizontal da densidade de elétrons.

Pedatella, Yue e Schreiner (2015) e Ram *et al.* (2016) desenvolveram metodologias para utilização de mapas obtidos a partir de valores da densidade máxima de elétrons na camada F₂ (NmF₂) como auxílio à inversa de Abel, para representação da variabilidade horizontal da ionosfera. Os mapas são obtidos com valores médios dos perfis de ocultação da missão COSMIC, com isso não são necessários dados externos. Entretanto, existem limitações observadas nesses trabalhos, principalmente em relação à dependência da quantidade e distribuição das observações de RO utilizadas para a obtenção dos mapas.

Em Chou *et al.* (2017) é apresentada uma metodologia para a utilização da inversa de Abel auxiliada por mapas derivados de valores de densidade de elétrons provenientes de modelos climatológicos. Esta abordagem é comparada com métodos utilizando informações de TEC e NmF₂. As três abordagens apresentaram melhorias em relação à inversa de Abel clássica. Em relação às metodologias consideradas, a principal limitação encontrada foi em relação à sua sensibilidade quanto às variações diárias da ionosfera. No período da noite em regiões de latitudes médias a inversa de Abel padrão apresentou melhores resultados que as metodologias com auxílio de outras informações.

Já Lin *et al.* (2018) apresentaram os resultados obtidos para recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir de dados de RO de um satélite chinês, realizando a validação com resultados de outras missões de RO, bem como de ionossondas. Entre as conclusões é destacado o erro obtido em regiões com elevada variação da densidade de elétrons, como a região próxima à anomalia equatorial.

³ IRI é um modelo ionosférico resultado de um projeto internacional financiado pela COSPAR (*Committee on Space Research*) e pela URSI (*Union Radio-Scientifique Internationale*).
Fonte: IRI (2019).

Com este cenário, fica claro o crescente interesse por pesquisas relacionadas ao uso da técnica de RO para a investigação da ionosfera. Conforme apresentado, a aplicação da inversa de Abel com auxílio de mapas ionosféricos tem se mostrado uma metodologia promissora, mas ainda com limitações, em especial para regiões com comportamento mais irregular da ionosfera, como é o caso do Brasil. Com isso, uma possibilidade de investigação é a aplicação da inversa de Abel com auxílio de informações locais, para melhor representar a variação horizontal da ionosfera, considerando as características de regiões com atividade ionosférica mais intensa. Entre as possíveis fontes de dados para esta abordagem existem os mapas ionosféricos com maior resolução, como por exemplo, mapas regionais ionosféricos (*Regional Ionospheric Maps - RIMs*) e, ainda, a inclusão de dados de estações GNSS de regiões críticas nos modelos utilizados.

A partir do exposto, a hipótese do presente trabalho é que: “Em regiões com intensa variabilidade no gradiente horizontal da densidade de elétrons, a utilização de mapas ionosféricos e informações regionais como auxílio aos dados de rádio ocultação constitui uma abordagem mais eficiente para a recuperação de perfis de densidade de elétrons”. Para a investigação desta hipótese o presente projeto buscou reunir esforços para avaliar a técnica de recuperação de perfis de densidade de elétrons utilizando dados de RO-GNSS. Primeiramente foram avaliados os mapas ionosféricos disponíveis para a região brasileira, considerando modelos globais, regionais e híbridos. Posteriormente foi desenvolvido um estudo da disponibilidade de dados ionosféricos provenientes de RO e sua cobertura em relação à região brasileira. Por fim, foram desenvolvidas e avaliadas metodologias de recuperação de perfis de densidades de elétrons com a utilização de mapas ionosféricos e informações regionais, que fossem aplicáveis ao cenário brasileiro. A metodologia desenvolvida foi implementada e testada no software CDAAC⁴ (*Cosmic Data Analysis and Archive Center*), desenvolvido para o processamento dos dados da missão COSMIC e, atualmente, utilizado para o processamento de diversas missões com dados de RO, como GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) e CHAMP. As metodologias foram avaliadas considerando medições *in situ* e observações de solo por meio de ionossondas.

⁴ CDAAC é nome do centro responsável pelo desenvolvimento e processamento dos dados das missões COSMIC. É também o nome dado ao software utilizado para o processamento dos dados desta missão. Fonte: HUNT et al. (2017).

1.1 OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como objetivo desenvolver e validar uma metodologia para recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir de dados de RO auxiliados por mapas ionosféricos e informações regionais considerando a realidade brasileira. A partir deste objetivo, têm-se como objetivos específicos:

- Realizar análise temporal da disponibilidade e cobertura, em relação ao território brasileiro, de perfis ionosféricos provenientes de RO;
- Avaliar o desempenho do software CDAAC e de outras ferramentas análogas para a recuperação de perfis de densidade de elétrons considerando o território nacional;
- Avaliar o desempenho de modelos ionosféricos globais e regionais para a região brasileira;
- Desenvolver e validar uma metodologia para a utilização de mapas ionosféricos para auxiliar a recuperação de perfis de densidade de elétrons utilizando dados da constelação COSMIC e implementá-la no software CDAAC;
- Estabelecer o formato dos produtos ionosféricos gerados e formas de visualização e análise de dados de RO-GNSS.

1.2 JUSTIFICATIVA

Uma das principais vantagens da utilização da RO é permitir a recuperação de informações da atmosfera com distribuição homogênea, incluindo regiões remotas. Com isso, informações de áreas não alcançadas por outras técnicas podem ser obtidas e inseridas em produtos como mapas ionosféricos ou modelos de NWP. Neste sentido, o tema se mostra de grande relevância nacional e internacional, sendo que no Brasil em específico, o assunto é de grande importância devido ao irregular comportamento da densidade de elétrons da região. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos em âmbito nacional e internacional em relação à atmosfera neutra e a ionizada, uma vez que os efeitos dessas camadas podem influenciar diretamente a qualidade do posicionamento GNSS (ALVES *et al.*, 2016; PROL e CAMARGO, 2016; PEREIRA e CAMARGO, 2017; VANI *et al.*, 2017; PROL *et al.*, 2018a; MARQUES *et al.*, 2018). Com isso, propostas como essa se mostram relevantes devido às possibilidades de contribuição na modelagem e mitigação de erros nas medidas GNSS. Além disso, o tema proposto está vinculado ao projeto Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) (Processo CNPq: 465548/2014-2) e Políticas Públicas (Processo FAPESP: 2017/50115-0) “Tecnologia GNSS no suporte à Navegação Aérea”, parceria entre a Universidade Estadual Paulista

(UNESP), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) e o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), uma vez que busca contribuir para obtenção e avaliação de informações ionosféricas, o que tem impacto direto na qualidade do posicionamento GNSS.

O potencial da RO tem despertado interesse em diversas áreas de aplicação. O desenvolvimento de missões atuais como a COSMIC-2, em continuidade à missão COSMIC, e GRACE-FO (*GRACE Follow On*), em continuidade à missão GRACE, comprovam isso. Além dessas, as constelações GNSS também estão sendo ampliadas. Atualmente, o GLONASS se encontra com constelação completa e o Galileo e o BeiDou têm constantemente lançado novos satélites, sendo que em junho de 2020 o BeiDou foi declarado operacional (SPACE NEWS, 2021). Com o aumento no número de satélites LEO (com receptores para o uso da técnica de RO) e GNSS, existe potencial para um crescimento significativo da quantidade de dados de RO, o que, conseqüentemente, estimula a exploração desta técnica.

Outro indicativo que coloca o Brasil em evidência nesta área é a parceria entre a UNESP e o INPE que mantêm colaboração com o grupo da COSMIC/UCAR (*University Corporation for Atmospheric Research*). Em dezembro de 2015 foi assinado um acordo entre a UNESP e a UCAR para a licença da utilização do software CDAAC, que inclui código fonte e descrição do mesmo, algoritmos de determinação de órbita e inversões atmosféricas, entre outros. O contrato inicial, com validade de cinco anos, foi renovado no final de 2020.

Outra importante contribuição do presente projeto é a autonomia que o mesmo pode proporcionar na recuperação de perfis a partir de dados de RO, uma vez que grande parte das pesquisas relacionadas à RO no Brasil utiliza-se de perfis disponibilizados por centros internacionais. O primeiro trabalho relacionado à RO desenvolvido na UNESP foi concluído em 2007 (HOLZSCHUH, 2007). Com o desenvolvimento da presente tese e implementação da metodologia proposta, é dada continuidade a esta linha de pesquisa, ainda relativamente nova no cenário nacional. Com isso, há uma ampliação das possibilidades de projetos sobre o tema permitindo diversos trabalhos em continuidade.

1.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições alcançadas com a pesquisa desenvolvida na presente tese foram nas áreas de avaliação de modelos ionosféricos e recuperação de perfis de RO. Em relação aos modelos ionosféricos foi proposta uma nova metodologia de avaliação de modelos globais considerando dados de ionossondas (JEREZ et al., 2020a; JEREZ et al., 2021a). Além disso, foi avaliada a influência das incertezas do VTEC na interpolação dos

valores de VTEC, bem como o impacto dessas incertezas no posicionamento GNSS (JEREZ et al., 2021b). Por fim, foi realizada uma avaliação do desempenho de mapas globais e regionais para a região brasileira considerando dados de ionossondas e o posicionamento GNSS.

Em relação à RO, foram desenvolvidos códigos para leitura e visualização dos produtos de RO, algumas formas de visualização são apresentadas no Apêndice D. Além disso, foi realizada uma revisão teórica com o histórico, principais missões, metodologias e produtos relacionadas à técnica. Os principais produtos ionosféricos da missão COSMIC foram avaliados considerando as ocultações com ocorrência no território nacional, considerando dados de ionossondas auxiliados por mapas globais (JEREZ et al., 2021c). As metodologias desenvolvidas na tese para a recuperação de perfis de densidades de elétrons considerando mapas ionosféricos foi comparada com dois diferentes produtos COSMIC, obtidos a partir de metodologias distintas, sendo avaliados com medições *in situ* e a partir de dados de ionossondas.

Além desses, outros trabalhos desenvolvidos foram publicados em periódicos ou divulgados em eventos nacionais e internacionais. A lista completa dos trabalhos desenvolvidos ou publicados durante o período do doutorado é apresentada no Apêndice I. Alguns projetos derivados dessa pesquisa foram desenvolvidos, estão em andamento ou planejados para serem iniciados ainda em 2021, como projetos de iniciação científica (MATHIAS, 2019; SILVA, 2020, 2021; NESPOLO, 2021, 2022; NUNES, 2022), de mestrado (MORAES, 2021) e de pós-doutorado (JEREZ, 2021).

1.4 ESTRUTURA DA TESE

O presente documento é composto de seis capítulos, estruturados conforme descrição a seguir. No Capítulo 2 é apresentada uma breve revisão histórica desde o início da utilização do conceito de ocultação de astros. Em seguida são listadas as principais missões que envolveram a técnica de RO, bem como algumas perspectivas futuras em relação às missões em desenvolvimento.

O Capítulo 3 apresenta a teoria envolvida na RO, desde a geometria até a recuperação de perfis atmosféricos. Ao final do capítulo são apresentadas diferentes abordagens alternativas para a recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir de dados de RO. No Capítulo 4 são apresentados os estudos realizados para a avaliação de mapas ionosféricos globais, regionais e híbridos, bem como uma investigação sobre o impacto do uso das incertezas do VTEC provenientes dos mapas na interpolação dos valores de VTEC e no posicionamento GNSS.

No Capítulo 5 são abordados os estudos realizados sobre a RO, primeiramente em relação à cobertura de dados das missões CHAMP, COSMIC e GRACE em relação à região brasileira. Posteriormente é apresentada a estratégia utilizada no software CDAAC, bem como as propostas avaliadas na presente tese. Os principais softwares disponíveis para recuperação de perfis de RO são apresentados no Apêndice D. Em seguida as metodologias são avaliadas considerando medições *in situ* e observações de solo por meio de ionossondas. No Capítulo 6 são apresentadas algumas considerações finais e recomendações.

2 RÁDIO OCULTAÇÃO

Nesta seção é apresentada uma breve revisão das primeiras pesquisas e missões utilizando a técnica, em seguida são apresentadas as principais missões de RO-GNSS e, por fim, algumas perspectivas futuras em relação às missões planejadas ou em andamento.

2.1 HISTÓRICO

No final da década de 1950 a obtenção de medidas por meio da observação de corpos ocultos já era utilizada para o estudo de outros planetas. Inicialmente com a utilização de ocultações estelares, a técnica já permitia o cálculo de parâmetros atmosféricos. Menzel e de Vaucouleurs (1960) apresentam as observações realizadas por pesquisadores em diversos observatórios em relação ao aparecimento e oclusão da estrela *Regulus*⁵ utilizando referência de tempo. A partir de observações de curvas luminosas fotoelétricas registradas e de informações complementares, foi possível estimar as coordenadas do centro de Vênus em relação à *Regulus*. Além disso, foram estimados valores de pressão da atmosfera do planeta, compatíveis com modelos atmosféricos da época.

A técnica evoluiu com o avanço tecnológico e da exploração espacial. Fjeldbo *et al.* (1965) apresentam a possibilidade de estudos da ionosfera de outros planetas propondo um método de ocultação utilizando um sistema de radar biestático⁶, a partir da propagação de ondas de rádio entre a Terra e um veículo espacial. Com o lançamento de missões de programas como *Mariner* e *Pioneer*, foi possível o desenvolvimento de diversas pesquisas relacionadas ao estudo da atmosfera de outros planetas. O Programa *Mariner* foi realizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em parceria com o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) sendo constituído de dez missões, lançadas entre 1962 e 1973, com objetivo de explorar os planetas Mercúrio, Vênus e Marte (NASA, 2019b). Com a missão *Mariner IV* (Figura 1 - a) foram iniciadas as investigações sobre Marte. Fjeldbo e Eshleman (1968) analisaram a atmosfera do planeta utilizando técnicas de inversão a partir de dados de RO da missão.

A missão *Mariner V* (Figura 1 - b) permitiu investigações e experimentos de RO para o estudo da atmosfera de Vênus. Em Fjeldbo e Eshleman (1969), a partir de medidas Doppler de sinais transmitidos pela sonda enquanto a mesma estava oculta por Vênus, foram

⁵ *Regulus* é uma estrela com intenso brilho pertencente à constelação de Leão.

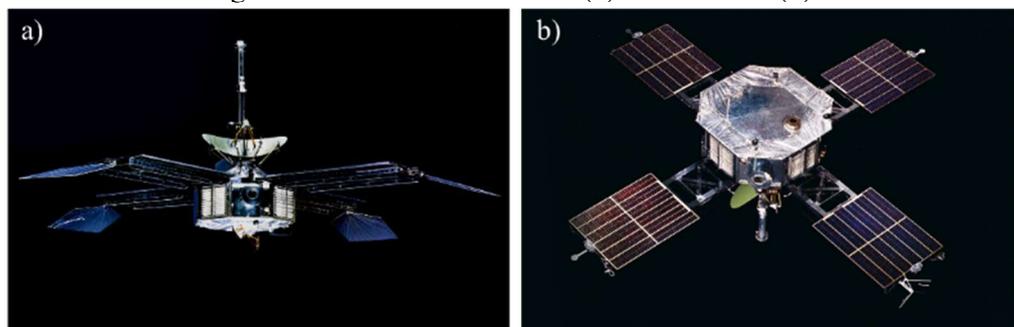
Fonte: NASA (2019a).

⁶ Radar biestático é um sistema de radar com o receptor localizado em local diferente do transmissor.

Fonte: Willis, N. J. (2005).

derivadas variações da composição da atmosfera do planeta. A partir disso, perfis de temperatura e pressão das camadas mais baixas da atmosfera de Vênus foram gerados. Já em Fjeldbo, Kliore e Eshleman (1971), medidas de RO foram utilizadas para obter, além dos perfis de temperatura e pressão, perfis de refratividade, densidade molecular e índices de absorção para realizar estudos da composição e comportamento da atmosfera de Vênus. Além do Programa *Mariner*, outras missões da NASA utilizaram a técnica de RO para investigação espacial, como as séries *Pioneer* e *Voyager* (KLIORE *et al.*, 1975, 1980; LINDAL, SWEETNAM e ESHLEMAN, 1985; LINDAL *et al.*, 1987).

Figura 1 – Missões *Mariner IV* (a) e *Mariner V* (b).



Fonte: NASA (2019c).

Os primeiros trabalhos a abordarem a possibilidade de utilizar a RO para a investigação da atmosfera terrestre surgiram no final da década de 1960. Fishcach (1965) e Lusignan *et al.* (1969) investigaram as possibilidades de obtenção de informação atmosférica a partir de dados obtidos por satélites em diferentes altitudes. Paralelamente a isso, na década de 1970 começaram a ser desenvolvidos o GPS e o GLONASS, sistemas pioneiros da navegação global por satélites, que alcançaram constelação completa em 1995. Com os sistemas GNSS e as missões com satélites LEO, a utilização da técnica de RO para investigações da atmosfera terrestre se tornou uma realidade. Com isso, diversas missões foram desenvolvidas, nem todas especificamente para obtenção de dados de RO, mas com satélites equipados com receptores que permitiam a exploração da técnica.

2.2 PRINCIPAIS MISSÕES DE RO-GNSS

Diversas missões foram lançadas com o objetivo de utilizar a técnica de RO para investigação da atmosfera terrestre. Entre 1995 e 1997 foi realizada a missão GPS/MET com objetivo de aplicar o conceito da RO. A missão resultou em diversos relatórios e trabalhos científicos, entre abordagens teóricas, com algoritmos de recuperação de perfis e assimilação

de dados, até avaliação dos resultados obtidos. Businger *et al.* (1996), Kursinski *et al.* (1996), Hajj e Romans (1998), Ahmad e Tyler (1999) e Feng e Herman (1999) são alguns exemplos.

Posteriormente, outras missões foram desenvolvidas, como CHAMP, GRACE, IOX (*Ionosphere Occultation Experiment onboard PicoSat*) e COSMIC. O Quadro 1 apresenta um resumo das missões lançadas com instrumentos de rádio ocultação, com respectivo período de dados disponíveis. No Apêndice B são listadas algumas fontes de informações sobre as missões.

Quadro 1 – Missões de RO-GNSS com respectivos períodos de dados disponíveis.

Acrônimo	Missão	Período de dados
GPS/MET	<i>GPS Meteorology</i>	1995 – 1997
<i>Sunsat</i>	<i>Stellenbosch University Satellite</i>	1999 – 2001
-	<i>Oersted</i>	1999 – 2001
IOX	<i>Ionosphere Occultation Experiment onboard PicoSat</i>	2001 – 2004
CHAMP	<i>Challenging Mini-satellite Payload</i>	2001 – 2008
C/NOFS	<i>Communications/Navigation Outage Forecasting System</i>	2008 – 2015
SAC-C	<i>Satélite de Aplicaciones Científicas-C</i>	2001 – 2013
SAC-D	<i>Satélite de Aplicaciones Científicas-D</i>	2011 – 2015
<i>Fesat</i>	<i>Federation Satellite</i>	2002 – 2007
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>	2006 – 2017
<i>Formosat-3/COSMIC</i>	<i>Formosa Satellite 3 / Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate</i>	2006 – 2020
<i>Formosat-7/COSMIC-2</i>	<i>Formosa Satellite 7 / Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate 2</i>	2019 – atual
<i>MetOp</i>	<i>Meteorological Operational satellite programe</i>	2006 – atual
<i>TerraSAR-X</i>	<i>Terra-Synthetic Aperture Radar X-band</i>	2008 – atual
TanDEM-X	<i>TerraSAR-X Add-on for Digital Elevation Measurement at X-band</i>	2010 – atual
MT	<i>Megha-Tropiques</i>	2011 – atual
KOMPSAT-5	<i>Korean Multipurpose Satellite-5</i>	2013 – atual
FY-3	<i>Feng Yun-3</i>	2013 – atual
CICERO	<i>Community Initiative for Continuing Earth Radio Occultation</i>	2017 – atual

Fonte: Adaptado de Mannucci *et al.* (2014).

A missão CHAMP, lançada em 2000, teve a importância de ser a primeira missão a obter dados de RO contínuos (2001-2008) em tempo quase real. Diversas pesquisas, incluindo as relacionadas à assimilação de dados de RO para NWP, foram possíveis devido aos dados desta missão (WICKERT *et al.*, 2001; JAKOWSKI, *et al.*, 2002; HEALY e THÉPAUT, 2006). Apesar de ser considerada uma missão pioneira, o número diário de ocultações ainda era limitado, em torno de 150 (ELGERED e WICKERT, 2017).

O experimento IOX foi componente da missão *PicoSat*, lançada em 2001. Este foi o primeiro conjunto de observações de cintilação ionosférica, com distribuição global, obtidos a partir de instrumentos de RO. Straus, Anderson e Danaher (2003) apresentam alguns

resultados obtidos no experimento, com estimativa de valores médios de cintilação obtidos a nível global.

A missão GRACE, lançada em 2002, teve como objetivo principal a detecção de variações a longo prazo do campo gravitacional da Terra. Os satélites gêmeos, que fizeram parte da missão, foram desenvolvidos com o mesmo modelo de receptor de RO utilizado na missão CHAMP (ELGERED e WICKERT, 2017). Beyerle, *et al.* (2005) e Healy *et al.* (2007) apresentam algumas aplicações dos dados da missão.

A missão FORMOSAT-3/COSMIC, lançada em 2006, resultou de uma parceria entre Estados Unidos (UCAR) e Taiwan (*NSPO – National SPace Organization*). A constelação, composta de seis satélites LEO, foi desenvolvida para realizar observações da atmosfera terrestre. Apesar de ter sido lançada como uma missão experimental, a mesma obteve resultados operacionais. Seus dados apresentaram benefícios para meteorologia, permitindo a incorporação de informações em modelos de NWP (ANTHES *et al.*, 2008). Com a missão, o número de ocultações diárias obtidas inicialmente era em torno de 2000. Até 2013 esse valor diminuiu para em torno de 1000 ocultações devido a problemas apresentados em alguns satélites, após o tempo de vida útil ter sido atingido (ELGERED e WICKERT, 2017). Com diversas aplicações, os dados da missão COSMIC possibilitaram pesquisas que avaliaram a qualidade dos dados, além de estudos relacionados à atmosfera neutra e à ionosfera (SCHREINER *et al.*, 2007; HE *et al.*, 2009; ZENG *et al.*, 2008). No dia 28 de maio de 2020 o último satélite da missão COSMIC encerrou suas atividades, 14 anos após o início da missão (NCAR & UCAR NEWS, 2020).

Com o intuito de armazenar e fornecer as informações da missão COSMIC foi criado o CDAAC. Posteriormente, visando aumentar a quantidade de observações disponibilizadas para a comunidade científica, o centro passou a armazenar e processar dados de outras missões (CDAAC, 2021). O Quadro 2 apresenta as missões com dados disponibilizados pela CDAAC com os respectivos períodos. As épocas dos dados são apresentadas seguindo o formato YYYY.DDD, onde os quatro primeiros dígitos são referentes ao ano (Y) e os três últimos ao dia do ano (D).

Considerando todas as missões com dados disponibilizados pelo CDAAC, o número de ocultações com perfis da atmosfera neutra tem um total de 15.917.301, enquanto para a ionosfera existe um total de 5.219.683 ocultações, desde o dia 21 de abril de 1995 até 31 de agosto de 2021.

Quadro 2 – Missões com dados disponibilizados pelo CDAAC.

Missão	Pós-processado	Reprocessado	Quase tempo real
CHAMP	–	2001.139 – 2008.279	–
C/NOFS	2010.060 – 2011.365	–	–
COSMIC	2014.121 – 2020.122	2006.112 – 2014.120	–
COSMIC-2	–	–	2019.274 – atual
GEOOPT	–	–	2020.351 – 2021.014
GPS/MET	1995.111 – 1997.047	–	–
GPS/MET-AS	1995.237 – 1997.016	–	–
GRACE	2007.059 – 2017.334	–	–
KOMPSAT5	2015.022 – 2021.059	–	–
<i>MetOp-A</i>	2016.001 – 2021.059	2007.274 – 2015.365	–
<i>MetOp-B</i>	2016.001 – 2021.059	2013.032 – 2015.365	–
<i>MetOp-C</i>	2019.195 – 2021.059	–	–
<i>PAZ</i>	2018.130 – 2021.059	–	–
SAC-C	2006.068 – 2011.215	–	–
SPIRE	–	–	2020.352 – 2021.015
TDX	2016.001- 2021.059	–	–
<i>TerraSAR-X</i>	2008.041 – 2021.059	–	–

Fonte: CDAAC (2021).

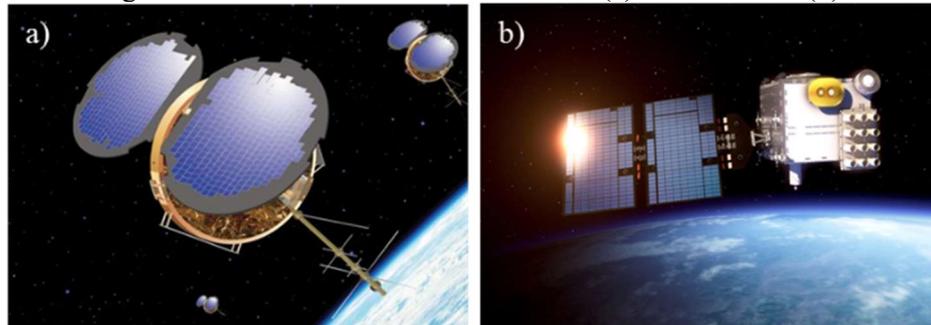
2.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

As missões apresentadas anteriormente se utilizaram de dados da constelação GPS. Além deste sistema, existe ainda o russo GLONASS e o chinês BeiDou, também operacionais, além do sistema europeu em desenvolvimento, Galileo. Após um longo período de degradação, o GLONASS foi modernizado e teve sua constelação restabelecida em 2011 (REVNIVYKH *et al.*, 2017). Em junho de 2020 o BeiDou foi declarado operacional também com constelação completa (SPACE NEWS, 2021). O sistema Galileo tem realizado lançamentos nos últimos anos e deve completar sua constelação em breve (TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017). Com esse novo cenário, as missões que estiverem preparadas para as configurações desses sistemas terão a possibilidade de obter um número significativamente maior de ocultações por dia, em comparação às missões anteriores.

Além dos sistemas de navegação global por satélites, novas missões com satélites LEO estão em andamento. Como continuidade à missão COSMIC, teve início o desenvolvimento da missão FORMOSAT-7/COSMIC-2, novamente uma parceria entre a UCAR e a NSPO. A constelação, contando com doze microssatélites LEO planejados, deverá realizar coleta de dados de previsão do tempo, ionosfera e gravidade. A missão tem por objetivo avançar a capacidade de previsões e modelagens atmosféricas a nível regional e global. O número de observações previstas para serem obtidas é maior que a geração anterior, devido ao maior número de satélites, e aos receptores *multi-GNSS* (TRIG-RO), com isso a missão deve

rastrear dados das constelações GPS, Galileo e GLONASS, sendo esperada a obtenção de até 12.000 perfis por dia com a missão completa (ELGERED e WICKERT, 2017). A Figura 2 apresenta os modelos de satélites das missões COSMIC (a) e COSMIC-2 (b).

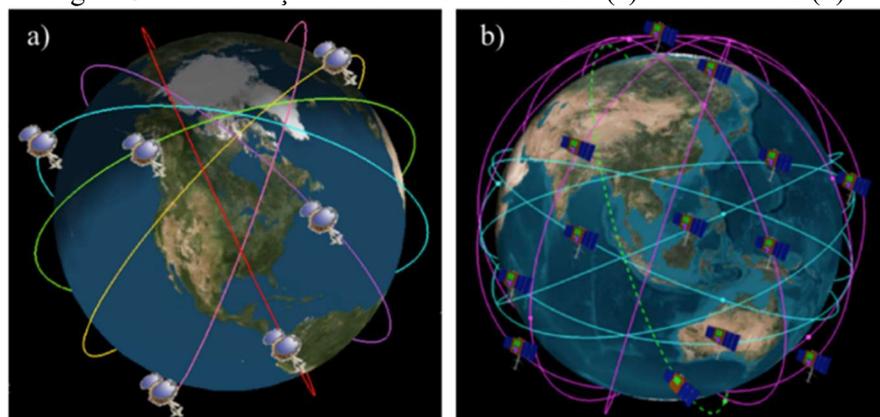
Figura 2 – Satélites das missões COSMIC (a) e COSMIC-2 (b).



Fonte: COSMIC (2021b).

A Figura 3 apresenta as constelações das duas missões, COSMIC (a) e COSMIC-2 (b). A constelação COSMIC-2 é dividida em dois grupos, COSMIC-2A (azul) e COSMIC-2B (rosa), apresentando configurações diferentes em relação à inclinação das órbitas da missão original. Os satélites COSMIC-2A possuem 24° de inclinação, enquanto os COSMIC-2B possuem 72° de inclinação. A intenção é que seja obtida uma melhor cobertura das regiões equatoriais, com a configuração dos satélites COSMIC-2A, enquanto os COSMIC-2B seriam substitutos da missão anterior, por isso a configuração semelhante (EO PORTAL DIRECTORY, 2019a).

Figura 3 – Constelações das missões COSMIC (a) e COSMIC-2 (b).



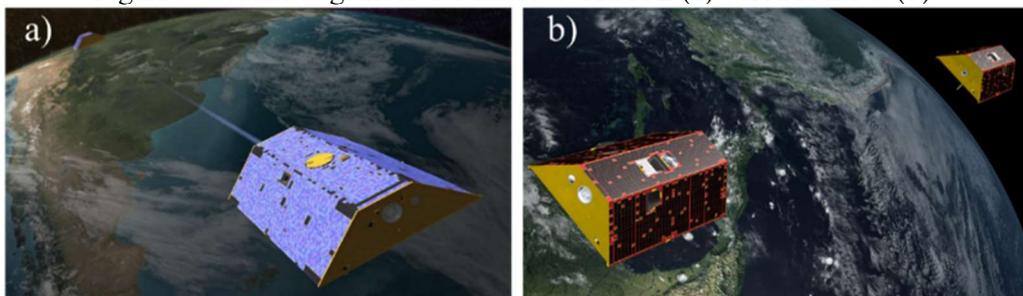
Fonte: COSMIC (2021b).

Após algumas mudanças nos planos de lançamentos dos satélites COSMIC-2A, os mesmos foram lançados em 25 de junho de 2019 (NOAA, 2021). Quanto aos satélites COSMIC-2B, devido a problemas de financiamento, a produção e lançamento foram suspensos em outubro de 2017 (GUNTER'S SPACE PAGE, 2019; EO PORTAL DIRECTORY, 2019a).

Mesmo antes de seu lançamento, diversos trabalhos já exploravam o potencial da missão COSMIC-2, como Yue *et al.* (2014), Tseng *et al.* (2018) e Hsu, Matsuo e Liu (2018). E em trabalhos mais recentes podem ser verificados os primeiros resultados com dados da missão, como em Schreiner *et al.* (2020).

Desde 2009 estava em desenvolvimento a missão GRACE-FO, em 22 de maio de 2018 foram lançados os satélites gêmeos da missão (NASA, 2019d). Além de ter como objetivo dar continuidade às medidas do campo gravitacional da Terra, os satélites também são equipados com receptores TRIG-RO. Desenvolvidos pela NAPA/JPL, TRIG-RO são receptores de dados de RO capazes de rastrear não apenas dados da constelação GPS, mas também GLONASS, Galileo e BeiDou (PODAAC, 2019). Esse tipo de receptor foi originalmente desenvolvido para a missão COSMIC-2, passando a ser adotado em diversas missões como *Jason-CS (Jason Continuity of Service)*, *DESDynI (Deformation, Ecosystem Structure, and Dynamics of Ice)* e *DSAC (Deep Space Atomic Clock)* (EO PORTAL DIRECTORY, 2019b). A Figura 4 apresenta os satélites da missão GRACE (a) e GRACE-FO (b). Trabalhos como os de Nie, Shen e Chen (2019) e Okay Ahi e Jin (2019) apresentam algumas investigações utilizando informações da missão.

Figura 4 – Satélites gêmeos das missões GRACE (a) e GRACE-FO (b).



Fonte: NASA/JPL (2019a; 2019b).

Após os lançamentos dos satélites da missão *MetOP (Meteorological Operational satellite programme)*, *MetOp-A* (19/10/2006) e *MetOp-B* (17/09/2012), o terceiro e último satélite da série, *MetOp-C*, foi lançado em novembro de 2018 (OPPA, 2019). Atualmente, está em desenvolvimento a missão *MetOp-SG (MetOp-Second Generation program)*, composta por dois satélites (*MetOp-SG-A* e *MetOp-SG-B*). Com lançamentos previstos para 2024, os satélites da missão também serão equipados com receptores de RO (EUMETSAT, 2021).

Existem ainda iniciativas privadas como a *GeoOptics*, empresa que, entre outros projetos, desenvolveu a missão *CICERO (Community Initiative for Continuous Earth*

Remote Observation) com objetivo de coletar dados de RO e de reflectometria. Os dados da missão serão disponibilizados de forma gratuita para pesquisas científicas na página da empresa. Os primeiros satélites foram lançados em julho de 2017 e já existem planos de expansão da missão com a CICERO-2. Mais informações são disponibilizadas na página da *GeoOptics* (<http://www.geooptics.com>).

Com o avanço das missões com satélites LEO e continuidade da implantação dos sistemas GNSS, uma grande quantidade de dados estará disponível, elevando consideravelmente as possibilidades de aplicações da técnica de RO e a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas nesta área.

3 RECUPERAÇÃO DE PERFIS ATMOSFÉRICOS

Na presente seção são apresentados os principais conceitos relacionados à rádio ocultação. Inicialmente é apresentada uma breve revisão da divisão da atmosfera em relação à sua camada neutra e ionizada, posteriormente a geometria envolvida na ocultação GNSS é abordada e, por fim, são apresentados métodos de recuperação de perfis da atmosfera neutra e da ionosfera, além de algumas abordagens alternativas aplicadas em trabalhos recentes.

3.1 ESTRUTURA DA ATMOSFERA

Nos estudos relativos à atmosfera terrestre, diversas divisões de suas camadas foram criadas de acordo com a área de estudo. Essas classificações da atmosfera podem ser relacionadas às suas propriedades físicas ou em relação às influências que a mesma pode causar na propagação de ondas eletromagnéticas. Nos estudos que envolvem a propagação de ondas eletromagnéticas, em geral, a divisão se dá em duas camadas, uma neutra e outra ionizada. A atmosfera neutra corresponde à camada mais próxima da superfície, até uma altitude de aproximadamente 50 km, enquanto a atmosfera ionizada é a camada seguinte, compreendendo uma altitude de até 1000 km aproximadamente (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2008).

A estrutura da atmosfera também pode ser caracterizada por um perfil de temperatura. Na Figura 5 (a) é possível verificar a partir da superfície terrestre, um decréscimo da temperatura com o aumento da altitude até em torno de 10 km (troposfera), em seguida, há uma inversão deste padrão no início da estratosfera. Esse aumento se torna máximo em torno de 50 km, no limite da estratosfera com a mesosfera, onde ocorre uma nova inversão de comportamento com diminuição da temperatura, que atinge seu mínimo em uma altitude em torno de 90 km. A partir da mesosfera, há um aumento significativo da temperatura, motivo pelo qual a região é denominada termosfera (KELLEY, 2009).

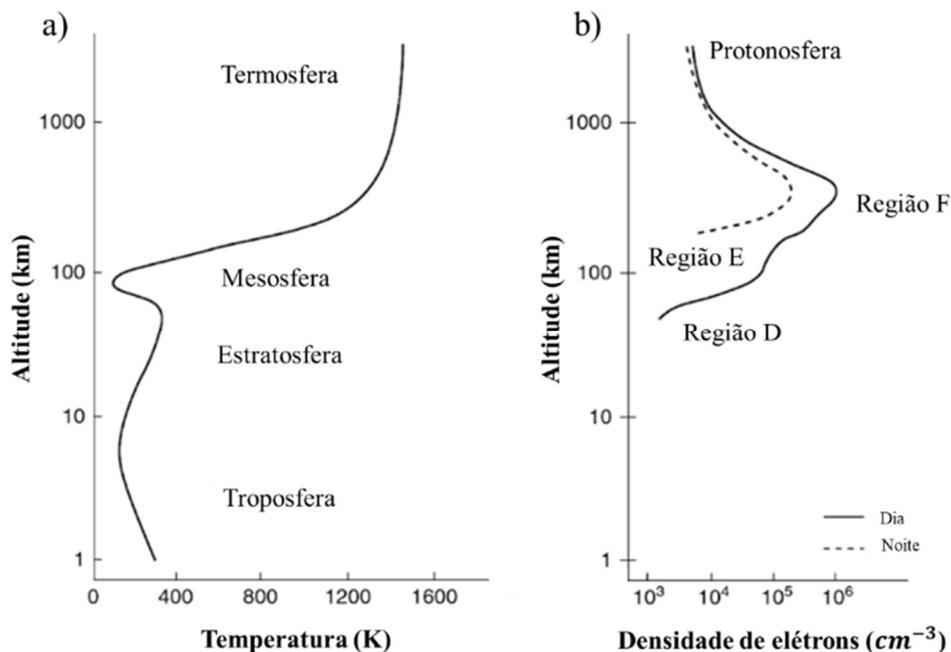
A camada neutra da atmosfera compreende a troposfera e a estratosfera, sendo referida comumente na área de posicionamento GNSS como simplesmente troposfera. A atmosfera neutra é um meio não dispersivo para frequências até 30 GHz, cujo índice de refração é relacionado à temperatura, pressão e pressão parcial do vapor d'água (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2008).

A camada ionizada da atmosfera é conhecida como ionosfera, sendo melhor caracterizada por perfis de densidade de elétrons. A Figura 5 (b) apresenta dois perfis de

densidade de elétrons característicos de regiões de latitudes médias, para o dia e para a noite. A ionosfera é subdividida em subcamadas (Regiões D, E e F) que sofrem variações de acordo com a hora do dia (KELLEY, 2009).

A camada D, correspondente à altitude de 50 a 90 km, possui a menor densidade entre as camadas da ionosfera, varia de acordo com a incidência solar e deixa de existir ao anoitecer. A camada E tem altitude de 90 a 150 km, também conhecida como camada *Kennelly-Heaviside*, é afetada por ondas de gravidade, apresentando influência do campo geomagnético e elétrico. A camada F, com altitude de 150 a 500 km, é também conhecida como camada de *Appleton*, apresenta ionização máxima ao meio-dia com decréscimo após o pôr do sol. Esta camada é dividida ainda em duas regiões, F₁ e F₂. A região F₁ possui altitude de 150 a 200 km, caracterizada por uma inflexão na curva de densidade de elétrons, enquanto a região F₂ possui altitude de 200 a 1000 km durante o dia, a densidade de elétrons máxima ocorre nesta região. A região acima de 500 km é conhecida como *topside*, onde há um decréscimo exponencial da densidade de elétrons em relação à altitude (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2008; KELLEY, 2009; PROL, 2019).

Figura 5 – Perfis típicos de temperatura da atmosfera (a) e de densidade elétrons da ionosfera (b) em relação às camadas atmosféricas.



Fonte: Adaptado de Kelley (2009).

Os efeitos causados pela ionosfera na propagação de ondas eletromagnéticas são proporcionais ao TEC, ou seja, ao número de elétrons presentes na atmosfera. O TEC corresponde à quantidade de elétrons contida em uma coluna que vai do transmissor ao receptor,

com base de um metro quadrado. O TEC é dado em elétrons/m², sendo, em geral, adotada a unidade TECU (*TEC Unit*), correspondente a 1×10^{16} elétrons/m². Esses valores variam no tempo e no espaço tendo relação com a localização geográfica, atividade geomagnética, estação do ano e ciclos de manchas solares (MCNAMARA, 1991).

Em relação à localização geográfica, os níveis de densidade de elétrons são mais intensos nas regiões equatoriais (onde se situa grande parte do território brasileiro), menos intensos nas latitudes médias e seguem comportamento menos previsível nas altas latitudes. Nas regiões equatoriais os efeitos da ionosfera são relacionados, entre outros, à anomalia de ionização equatorial (EIA - *Equatorial Ionization Anomaly*) com intensidade maior no pico local da anomalia (latitudes geomagnéticas aproximadas de $\pm 15^\circ$) (MCNAMARA, 1991; SEEBER, 2003).

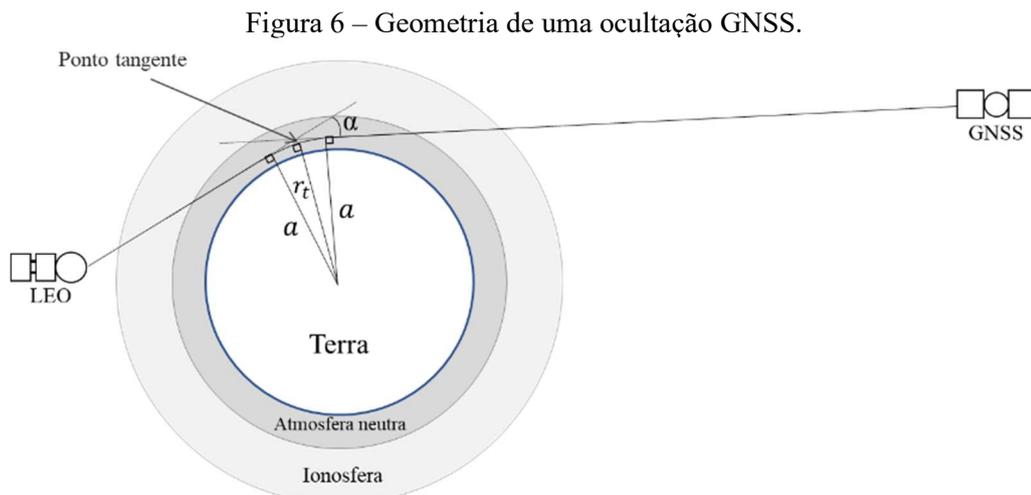
O campo geomagnético pode sofrer influência das atividades solares, como explosões e manchas solares. Esses eventos podem causar os chamados ventos solares que podem afetar as linhas de força do campo, fazendo com que as mesmas sejam comprimidas. Conseqüentemente, essas perturbações no campo geomagnético resultam em modificações do meio ionizado da ionosfera (KELLEY, 2009; PROL, 2019).

As variações temporais podem ser diurnas, sazonais e em ciclos de longo período. As diurnas estão relacionadas a mudanças em regiões da ionosfera, que ocorrem devido a recombinações de elétrons e íons distribuídos em suas camadas. As mudanças sazonais se relacionam às variações na densidade de elétrons causadas pela variação do ângulo zenital do Sol e pelo fluxo de ionização, que mudam devido às estações do ano, sendo a radiação incidente na Terra mais direta no verão, causando assim aumento da ionização. Já os ciclos de longo período correspondem aos ciclos solares, que ocorrem em intervalos de aproximadamente 11 anos, sendo associados ao número de manchas solares. As manchas solares correspondem a regiões mais frias e escuras na superfície do Sol. Em volta dessas regiões existe elevado nível de emissão de radiação ultravioleta. Com isso o aumento de manchas leva ao aumento da radiação solar e, conseqüentemente, mudança na densidade de elétrons da ionosfera (MCNAMARA, 1991; HAUSCHILD, 2017). O pico do último ciclo solar, ciclo 24, ocorreu entre o final de 2013 e início de 2014.

3.2 GEOMETRIA DA RO-GNSS

A recuperação de perfis atmosféricos a partir de dados de RO está diretamente relacionada ao conceito de refração. Isso porque a RO só é possível devido à atmosfera, que refrata o sinal transmitido, alterando sua velocidade de propagação e trajetória. Devido a essa ação, o sinal GNSS chega ao receptor instalado no satélite LEO, ainda que o mesmo esteja oculto pela Terra (KURSINSKI *et al.*, 1997; 2000).

Durante a ocultação, que em geral dura de um a três minutos, com a variação da posição entre os satélites GNSS e LEO, é possível obter um perfil de refração do sinal eletromagnético. A Figura 6 apresenta a geometria de uma ocultação, onde é possível verificar os principais elementos envolvidos: o ângulo de refração (α), o parâmetro de impacto (a) e o raio de tangência (r_t), que corresponde à distância entre o centro da Terra e o ponto tangente (p_t).



Fonte: Adaptado de Kursinski (1997).

O índice de refração (n) em um meio é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no meio (v):

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1)$$

Considerando frequências de micro-ondas, o índice de refração total é próximo à unidade, de modo que normalmente é discutido em termos de refratividade (N), definida como (SYNDERGAARD, 1999):

$$N = (n - 1) \times 10^6. \quad (2)$$

A partir do índice de refração diversos perfis atmosféricos podem ser obtidos, como a temperatura, pressão e umidade da atmosfera neutra, e a densidade de elétrons da ionosfera. A refratividade pode ser expressa em função da pressão atmosférica hidrostática

(P_{hid}) dada em mbar, da pressão parcial de vapor d'água (P_w) dado em mbar, da temperatura atmosférica (T) dada em Kelvin, da densidade de elétrons (n_e) dada em elétrons por metro cúbico, da frequência (f) dada em Hertz e do conteúdo líquido de água (W) dado em gramas por metro cúbico (KURSINSKI, 1997, SYNDERGAARD, 1999). A equação geral é dada por:

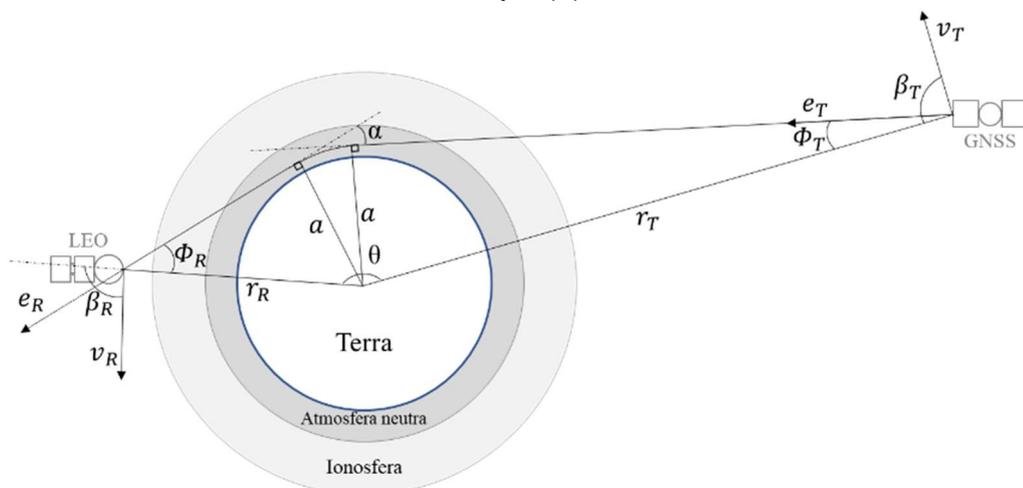
$$N = 77,6 \frac{P_{hid}}{T} + 70,4 \times \frac{P_w}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} - 4,03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} + 1,4W. \quad (3)$$

Considerando a proximidade entre as constantes dos dois primeiros termos e que P_w é inferior a P_{hid} , o segundo termo geralmente é incluído no primeiro. Além disso, considerando que o último termo da expressão apresenta valores muito baixos em relação aos demais, o mesmo é comumente suprimido. Assim, a expressão pode ser apresentada como (considerando $P = P_{hid} + P_w$, pressão total):

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} - 4,03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2}. \quad (4)$$

Para a recuperação do ângulo de refração (α) são consideradas três abordagens: o quadrilátero formado na geometria da ocultação; os índices de refração; e o efeito Doppler. A Figura 7 apresenta os elementos necessários para a derivação do ângulo de refração a partir da geometria de uma ocultação. Nela podem ser verificados os vetores de velocidade do receptor (v_R) e do transmissor (v_T), os vetores unitários indicando a direção do caminho do sinal (e_R e e_T), os raios contados dos satélites ao centro da Terra (r_R e r_T), os ângulos formados entre os raios e o caminho percorrido pelo sinal (Φ_R e Φ_T), os ângulos formados entre as direções dos raios e os vetores de velocidades (β_R e β_T) e o ângulo formado pelos raios dos satélites em relação ao centro da Terra (θ) (KURSINSKI, 1997).

Figura 7 – Elementos da geometria da ocultação GNSS necessários para a derivação do ângulo de refração (α).



Fonte: Adaptado de Kursinski (1997).

Considerando a geometria apresentada, a partir do quadrilátero formado, cujos ângulos internos são Φ_R , θ , Φ_T e $\pi - \alpha$, e o fato de que a soma dos ângulos internos de um quadrilátero corresponde a 2π , têm-se que:

$$\alpha = \Phi_T + \Phi_R + \theta - \pi. \quad (5)$$

A refração é o fenômeno que ocorre quando uma onda eletromagnética sofre um desvio em sua trajetória devido à diferença de densidade do meio que atravessa. A partir da lei da refração ou lei de Snell, considerando dois meios (a e b), a relação entre os ângulos (de incidência e refração) e os índices de refração dos meios (n) é dada por (BORN e WOLF, 1980):

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b. \quad (6)$$

A partir da lei de Burguer, que é equivalente à lei de Snell em meio simetricamente esférico, têm-se que o produto do índice de refração (n), pelo raio (r) e pelo seno do ângulo formado entre o raio do ponto considerado e o caminho do sinal (Φ) se mantém constante, correspondendo ao parâmetro de impacto (a), com isso (BORN e WOLF, 1980):

$$n_T r_T \sin \Phi_T = n_R r_R \sin \Phi_R = a, \quad (7)$$

em que n_T corresponde ao índice de refração do trajeto do sinal do transmissor do satélite GNSS até o ponto tangente e n_R corresponde ao índice de refração do trajeto do sinal desde o ponto tangente até o receptor instalado no satélite LEO.

O efeito Doppler é caracterizado pela variação observada na frequência de uma onda ocasionada pelo deslocamento relativo entre um emissor e um receptor (YOUNG e FREEDMAN, 2009). A relação entre a frequência emitida (f_e) e a frequência com deslocamento Doppler (f_d), considerando a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade aparente (v_a), é dada por:

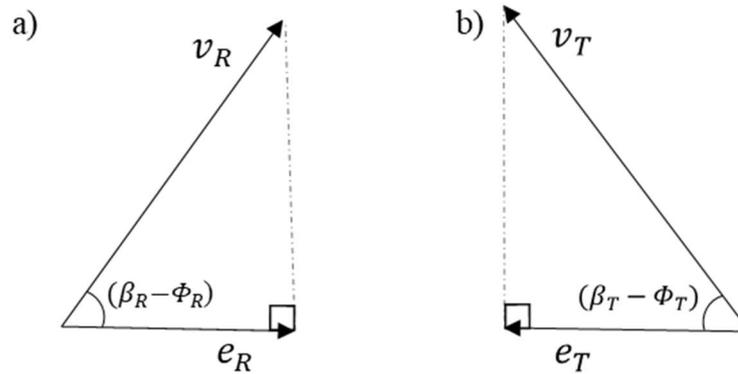
$$f_d = -\frac{f_e}{c} v_a. \quad (8)$$

A partir da Figura 7, pode ser obtida a seguinte equação da frequência com deslocamento Doppler (f_d), utilizando os vetores unitários que indicam a direção do sinal transmitido (e_T e e_R) e respectivos vetores de velocidade (v_T e v_R):

$$f_d = -\frac{f_e}{c} (\vec{v}_T \cdot \vec{e}_T - \vec{v}_R \cdot \vec{e}_R). \quad (9)$$

A Figura 7 pode ser decomposta em dois triângulos retângulos conforme a Figura 8, o primeiro em relação ao satélite LEO (a) e o segundo em relação ao GNSS (b).

Figura 8 – Triângulos decompostos da geometria da ocultação para os satélites LEO (a) e GNSS (b).



A partir da Figura 8 é possível verificar que os vetores unitários podem ser obtidos por:

$$\vec{e}_T = -\vec{v}_T \cos(\beta_T - \Phi_T), \text{ e} \quad (10)$$

$$\vec{e}_R = -\vec{v}_R \cos(\beta_R - \Phi_R) \quad (11)$$

Assim, a Equação (9) pode ser reescrita como:

$$f_d = \frac{f_e}{c} [v_T \cos(\beta_T - \Phi_T) - v_R \cos(\beta_R - \Phi_R)]. \quad (12)$$

Esta equação considera que os índices de refração nas posições dos satélites LEO e GNSS são iguais a um, o que foi demonstrado por Hajj e Romans (1998) ser uma aproximação que não acarreta erro significativo para altas altitudes (0,5% dos valores reais de ângulo de refração ou densidade de elétrons). A frequência com deslocamento Doppler considerando os índices de refração na posição do receptor (LEO) e do transmissor (GNSS) é apresentada por Schreiner *et al.* (1999):

$$f_d = f_e \left[\frac{c - n_R v_R \cos(\beta_R - \Phi_R)}{c - n_T v_T \cos(\beta_T - \Phi_T)} - 1 \right]. \quad (13)$$

As equações (12) e (13) são equivalentes, desde que os índices de refração sejam considerados iguais a um. A partir das equações (5), (7) e (12) o ângulo de refração pode ser estimado de forma iterativa. A seguir são apresentadas as abordagens utilizadas para a recuperação de perfis da atmosfera neutra e da ionosfera, utilizando a técnica de RO. Ressalta-se que em relação à recuperação dos perfis relacionados à atmosfera neutra, é apresentada apenas uma visão geral do método, uma vez que o objetivo do presente projeto se concentra nos perfis ionosféricos.

3.3 RECUPERAÇÃO DE PERFIS DE TEMPERATURA E PRESSÃO

A relação entre o ângulo de refração e o índice de refração é dado pela equação (SYNDERGAARD, 1999):

$$\alpha(a) = -2a \int_{r_{pt}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n^2 r^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr. \quad (14)$$

Aplicando a inversa de Abel (BRACEWELL, 1986), é possível expressar o índice de refração (n) em função do ângulo de refração (α), do parâmetro de impacto (a) e do raio do ponto considerado (r).

$$n(r) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_a^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - n^2 r^2}} da \right]. \quad (15)$$

A dedução de $\alpha(a)$ e $n(r)$ (equações 14 e 15) com as particularidades para perfis da atmosfera neutra são apresentadas por Fjeldbo, Kliore e Eshleman (1971), a dedução para perfis ionosféricos será apresentada a seguir na Seção 3.4.

Conforme apresentado no início da Seção 3.2, a refratividade (N) possui contribuições de quatro fontes principais, podendo ser generalizada pela Equação (4), da qual fazem parte a pressão total (composta pela pressão hidrostática e pela pressão parcial de vapor de água), a temperatura e a densidade de elétrons. Em geral, a metodologia adotada para a recuperação de perfis da atmosfera neutra é a utilização de uma combinação linear das observáveis GNSS para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera, deixando a refratividade relacionada apenas à atmosfera neutra (KURSINSKI, 1997; SYNDENGAARD, 1999). A combinação linear é realizada a partir dos perfis de ângulos de refração obtidos para os dados de cada portadora (ELGERED e WICKERT, 2017), assim a combinação dos ângulos de refração pode ser dada por:

$$\alpha_c(a) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \alpha_1(a) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \alpha_2(a), \quad (16)$$

em que $\alpha_c(a)$ corresponde ao ângulo de refração corrigido dos efeitos de primeira ordem da ionosfera; $\alpha_1(a)$ e $\alpha_2(a)$ são os valores dos ângulos de refração obtidos com dados das portadoras L_1 e L_2 , respectivamente; e f_1 e f_2 correspondem às frequências nas portadoras L_1 e L_2 , respectivamente. Com isso, a Equação (4) pode ser reescrita apenas em função dos componentes da atmosfera neutra, eliminando o termo referente à ionosfera, assim temos que:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2}. \quad (17)$$

Em regiões de grandes altitudes atmosféricas ou regiões muito frias, com temperaturas inferiores a $250 \text{ K} \approx -23,15^\circ$, correspondente a alguns quilômetros de altitude em altas latitudes e acima de $\approx 10 \text{ km}$ em latitudes tropicais, pode ser aplicado um modelo simplificado, que não considera a componente úmida da atmosfera (KURSINSKI, 1997; SYNDENGAARD, 1999), obtendo-se:

$$N = 77,6 \frac{P}{T}. \quad (18)$$

Para as demais regiões, a Equação (17) pode ser ainda combinada com a equação de estado dos gases ideais para fornecer a densidade em função da refratividade. A pressão pode ser estimada a partir da densidade atmosférica utilizando a equação de equilíbrio hidrostático. Para a determinação da pressão úmida, a Equação (19) pode ser então apresentada como:

$$P_w = \frac{N T^2 - 77,6 T P}{3,73}. \quad (19)$$

Neste caso, se faz necessária a obtenção de valores de temperatura de outras fontes, como modelos climatológicos. A dedução das formulações completas e análises dos erros obtidos devido às generalizações realizadas são desenvolvidas em Kursinski (1997), além de trabalhos como Kursinski *et al.*, (1997) e Hocke (1997).

3.4 RECUPERAÇÃO DE PERFIS DE DENSIDADE DE ELÉTRONS

O fato de a distribuição dos elétrons da ionosfera não ser homogênea causa diversas interferências em tecnologias como o GNSS. Além disso, esta é a maior fonte de erros nos métodos de recuperação que assumem simetria esférica da atmosfera (SCHREINER *et al.*, 1999). Devido à sua complexidade, os estudos relacionados à recuperação da densidade de elétrons da ionosfera utilizando dados de rádio ocultação é investigada em diversos trabalhos. Nas primeiras abordagens, nas quais a atmosfera é considerada simetricamente esférica, os métodos de inversão mais frequentemente adotados utilizam a inversa de Abel a partir do ângulo de refração ou a partir do TEC. Posteriormente, outras abordagens foram desenvolvidas considerando diversas fontes de dados alternativas para representar a variação horizontal da ionosfera. Nesta seção são apresentados os métodos inicialmente empregados na recuperação destes perfis e, em seguida, abordagens propostas em trabalhos mais recentes.

3.4.1 *Abordagem clássica*

A dedução do ângulo de refração em função do parâmetro de impacto é apresentada por Garcia-Fernandez (2004). Nesta dedução, como é assumida simetria esférica, é possível utilizar a fórmula de Bourguer para relacionar o ângulo de refração e o índice de refração. Como o parâmetro de impacto é constante em uma linha reta, é possível obter a relação entre o ângulo de refração (α) e o índice de refração (n) partindo da Equação (7):

(i) considerando a onda em uma linha reta, com índice de refração igual a um, assim:

$$r \sin \Phi_r = a_r; \quad (20)$$

(ii) considerando o caminho real, a partir da fórmula de Bourguer (BORN e WOLF, 1980), em que:

$$n r \sin \Phi = a. \quad (21)$$

Derivando as equações (20) e (21) em relação ao raio (r) e ao ângulo (Φ_r ou Φ), e apenas a Equação (21) em relação ao índice de refração (n), tem-se:

$$\sin \Phi_r dr + r \cos \Phi_r d\Phi_r = 0; \quad (22)$$

$$r \sin \Phi dn + n \sin \Phi dr + n r \cos \Phi d\Phi = 0; \quad (23)$$

Realizando a multiplicação da Equação (22) pelo índice de refração e realizando sua subtração da Equação (23), obtemos:

$$r \sin \Phi dn + n (\sin \Phi - \sin \Phi_r) dr + n r (\cos \Phi d\Phi - \cos \Phi_r d\Phi_r) = 0. \quad (24)$$

Como o ângulo de refração não excede $0,03^\circ$ na camada ionosférica, é possível fazer uma aproximação da Equação (24), considerando que Φ e Φ_r sejam muito próximos (HAJJ e ROMANS, 1998; SCHREINER *et al.*, 1999). Com isso tem-se:

$$r \sin \Phi dn + n r \cos \Phi (d\Phi - d\Phi_r) = 0. \quad (25)$$

A diferença entre $d\Phi$ e $d\Phi_r$ corresponde ao incremento do ângulo de refração entre um ponto e outro (KURSINSKI, 1997), assim:

$$d\alpha = d\Phi - d\Phi_r. \quad (26)$$

Com isso, a Equação (25) pode ser reescrita como:

$$d\alpha = -\frac{\sin \Phi}{\cos \Phi} \frac{dn}{n}. \quad (27)$$

A partir da Equação (27) e considerando que a derivada da função logarítmica natural é dada por:

$$\frac{d \ln(n)}{dn} = \frac{1}{n}. \quad (28)$$

Tem-se que:

$$d\alpha = -\frac{\sin \Phi}{\cos \Phi} d \ln(n). \quad (29)$$

A partir da Equação (7), é possível obter:

$$\sin \Phi = \frac{a}{nr}. \quad (30)$$

Recorrendo à soma dos quadrados das funções seno e cosseno que é igual a um, tem-se que:

$$\cos \Phi = \sqrt{1 - \frac{a^2}{n^2 r^2}}. \quad (31)$$

Substituindo as Equações (30) e (31) na Equação (29), tem-se:

$$d\alpha = -\frac{a}{\sqrt{n^2 r^2 - a^2}} d\ln(n). \quad (32)$$

Considerando $x = nr$, a Equação (32) pode ser reescrita como:

$$d\alpha = -\frac{a}{\sqrt{x^2 - a^2}} d\ln(n). \quad (33)$$

Integrando a Equação (33) é obtida a expressão para o ângulo de refração no caminho entre os satélites GNSS e LEO:

$$\alpha(a) = -a \int_{x_{LEO}}^{x_{GNSS}} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d\ln(n)}{dx} dx, \quad (34)$$

em que x_{LEO} e x_{GNSS} são as posições dos satélites LEO e GNSS, respectivamente. Considerando a expressão para o ângulo de refração no caminho entre cada satélite e o ponto tangente (HAJJ e ROMANS, 1998), tem-se:

$$\alpha(a) = -a \left[\int_{r_t}^{x_{GNSS}} + \int_{r_t}^{x_{LEO}} \right] \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d\ln(n)}{dx} dx, \quad (35)$$

Assumindo que a contribuição entre os caminhos percorrido pelo sinal do GNSS até o ponto tangente e do ponto tangente até o LEO são iguais (simetria esférica), a expressão pode ser generalizada para:

$$\alpha(a) = -2a \int_{r_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d\ln(n)}{dx} dx. \quad (36)$$

Aplicando a inversa de Abel (BRACEWELL, 1986) é possível obter o índice de refração em função do ângulo de refração e do parâmetro de impacto:

$$\ln(n(x)) = \frac{1}{\pi} \int_a^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da. \quad (37)$$

Aplicando exponencial na equação, a mesma pode ser apresentada como (SCHREINER *et al.*, 1999):

$$n(r) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_a^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \right]. \quad (38)$$

A Equação (38) é utilizada para estimar o índice de refração, a relação entre o índice de refração e a densidade de elétrons é obtida pelas equações (2) e (4), considerando-se eliminada a influência da atmosfera neutra. Com isso, é possível obter (HAJJ e ROMANS, 1998):

$$n = 1 - 40,3 \frac{n_e}{f^2}. \quad (39)$$

Outra abordagem utilizada é considerando a utilização do TEC para a inversão da densidade de elétrons. O TEC entre os satélites LEO e o GNSS pode ser obtido pela integração da densidade de elétrons (SCHREINER *et al.*, 1999):

$$TEC = \int_{r_{LEO}}^{r_{GNSS}} n_e ds, \quad (40)$$

sendo s a distância entre o receptor e o transmissor. A Equação (40) pode ser descrita ainda a partir das distâncias (l) dos satélites ao ponto tangente, assim:

$$TEC = \left[\int_{p_t}^{x_{LEO}} + \int_{p_t}^{x_{GNSS}} \right] n_e(r) dl. \quad (41)$$

sendo $l = \sqrt{r^2 - r_t^2}$. Assumindo simetria esférica da atmosfera, a Equação (41) pode ser generalizada, considerando iguais as distâncias entre os dois satélites e o ponto tangente, assim:

$$TEC = 2 \int_{p_t}^{x_{LEO}} n_e(r) dl. \quad (42)$$

Derivando l em relação a r , obtém-se:

$$dl = \frac{r}{\sqrt{r^2 - r_{pt}^2}} dr. \quad (43)$$

Substituindo a Equação (43) em (42), tem-se:

$$TEC = 2 \int_{p_t}^{x_{LEO}} \frac{n_e(r) r}{\sqrt{r^2 - r_{pt}^2}} dr. \quad (44)$$

Recorrendo novamente à inversa de Abel (BRACEWELL, 1986), é obtida a equação para estimar a densidade de elétrons a partir do TEC.

$$n_e(r) = -\frac{1}{\pi r} \int_r^{r_R} \frac{dTEC/dr_{pt}}{\sqrt{r_{pt}^2 - r^2}} dr_{pt}. \quad (45)$$

A Equação (45) é utilizada em diversas abordagens recentes, conforme será apresentado na próxima seção. A estimativa do valor do TEC tem algumas possibilidades. A Equação (39) pode ser reescrita com a densidade de elétrons em função do índice de refração, assim:

$$n_e = -f^2 \frac{(n-1)}{40,3}. \quad (46)$$

A Equação (46) pode ser substituída na Equação (40), obtendo-se a relação entre o TEC e o índice de refração:

$$TEC = -\frac{f^2}{40,3} \int_{x_{LEO}}^{x_{GNSS}} (n-1) ds. \quad (47)$$

Uma opção para estimativa do TEC é utilizar o excesso de fase. A equação para obtenção do excesso de fase é apresentada por Schreiner *et al.* (1999):

$$S(a) = \left[\int_a^{x_{GNSS}} + \int_a^{x_{LEO}} \right] \frac{x(1-xn^{-1}dn/dx)}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx - l. \quad (48)$$

O excesso de fase consiste na diferença entre a fase medida, já corrigida das ambiguidades, e a fase estimada considerando a propagação do sinal no vácuo, equivalente à distância geométrica entre os satélites LEO e GNSS (s) (SYNDERGAARD, 1999). A partir da Equação (47) e da definição do excesso de fase, pode ser obtida a relação entre o TEC e o excesso de fase (S):

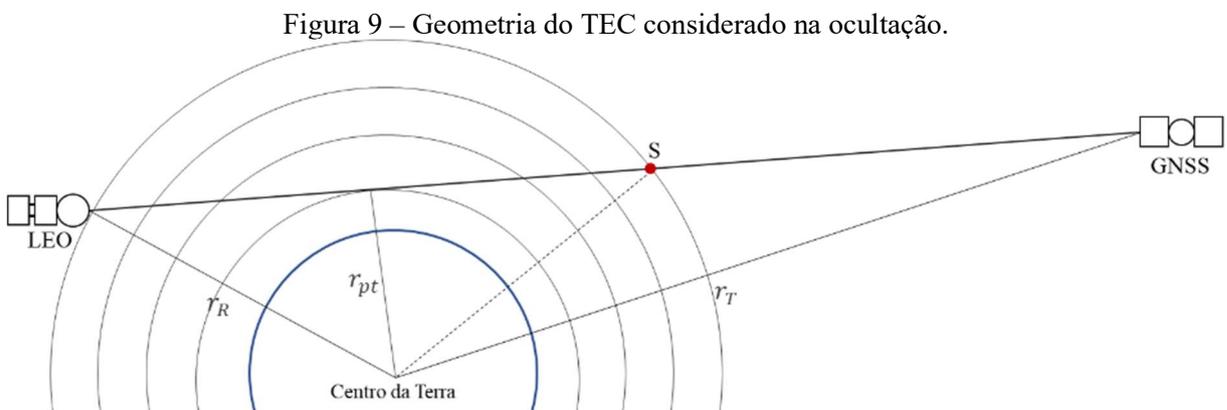
$$TEC = -\frac{f^2 S}{40,3}. \quad (49)$$

Schreiner *et al.* (1999) mostram que apesar dos valores de TEC calculados em portadoras diferentes apresentarem pequenas diferenças devido às diferenças de caminhos, essas diferenças são negligenciáveis. Com isso, considerando a Equação (49), o TEC pode ser estimado a partir do excesso de fase na portadora L_1 , L_2 ou a partir da diferença entre estas, conforme apresentado a seguir:

$$TEC = -\frac{S_1 f_1^2}{40,3} = -\frac{S_2 f_2^2}{40,3} = -\frac{(S_1 - S_2) f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)}. \quad (50)$$

A principal vantagem da utilização do TEC estimado a partir da diferenciação entre os valores obtidos com as duas portadoras é a eliminação dos erros relacionados às órbitas e relógios dos satélites. Esses erros devem ser precisamente estimados caso sejam utilizados valores obtidos de apenas uma frequência (SCHREINER, 1999).

Cabe ressaltar que a condição assumida na Equação (42), além de considerar a variação esfericamente simétrica do TEC, é contado apenas o TEC pertencente à área de simetria limitada pela órbita do satélite LEO. A Figura 9 apresenta a geometria do TEC na ocultação ao se considerar a simetria esférica em relação à posição do satélite LEO, onde o ponto S corresponde ao ponto de mesma altitude que a órbita do LEO.



Fonte: Adaptado de Schreiner *et al.* (1999) e Guo *et al.* (2015).

Assim, o TEC calibrado (TEC_{cal}) apresentado por Schreiner *et al.* (1999) corresponde ao TEC entre o LEO e o ponto S (TEC_{LEO-S}), que equivale à diferença do TEC entre o LEO e o GNSS ($TEC_{LEO-GNSS}$) e o TEC entre o GNSS e o ponto S (TEC_{GNSS-S}). A partir do TEC calibrado, a densidade de elétrons apresentada anteriormente na Equação (45) pode ser apresentada como:

$$n_e(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{r_R} \frac{dTEC_{cal}/dr_{pt}}{\sqrt{r_{pt}^2 - r^2}} dr_{pt}. \quad (51)$$

Como já foi enfatizado anteriormente, a utilização da inversa de Abel implica em assumir que a atmosfera é esfericamente simétrica. Essa consideração acarreta diversos erros principalmente quando são consideradas regiões com alta variação no gradiente de densidade de elétrons, como por exemplo a região da EIA (WU *et al.*, 2009; YUE *et al.*, 2010; SHAIKH, NOTARPIETRO e NAVA, 2014). Para atenuar essa limitação diversas abordagens foram propostas, as principais são apresentadas a seguir.

3.4.2 *Abordagens alternativas*

De forma geral, a maior parte dos métodos de auxílio à inversa de Abel propostos recentemente apresentam similaridade, sendo as principais diferenças relacionadas às fontes de dados utilizadas e aos métodos de assimilação adotados (YUE, SCHREINER e KUO, 2013). Em um dos primeiros trabalhos com aplicação deste tema, Schreiner *et al.* (1999) seguem o método proposto por Hajj *et al.* (1994) de utilizar a inversão baseada na tomografia⁷ da ionosfera com a inclusão de injunções. Foram utilizados dados da missão GPS/MET e dados auxiliares de mapas globais do JPL e de ionossondas para ajustar o modelo PRISM (*Parametrized Real-time Ionospheric Specification Model*) em três abordagens distintas. Diversas análises estatísticas são apresentadas, sendo encontradas diferenças significativas entre os resultados obtidos e os valores adotados como referência.

Em Hernández-Pajares, Juan e Sanz (2000) é proposta a utilização de dados de estações terrestres para estimar os valores de VTEC para auxiliar a inversa de Abel clássica. É utilizada uma função para converter o valor de VTEC em densidade de elétrons e introduzir essas informações para representar a variabilidade horizontal da ionosfera. Em todos os casos analisados a metodologia proposta apresentou melhor desempenho que o método tradicional. Os autores ressaltam que apesar dos testes terem sido realizados para regiões de latitudes médias e existir a possibilidade de o método proposto apresentar problemas quando aplicados a regiões com alta variabilidade da densidade de elétrons, ainda assim, sua representação da ionosfera deve ser mais próxima da realidade que o modelo considerando simetria esférica da atmosfera. Garcia-Fernandez *et al.* (2003; 2005) aplicam a metodologia para dados das missões GPS/MET, CHAMP e SAC-C (*Satélite de Aplicaciones Científicas-C*), obtendo novamente melhor desempenho que o método tradicional.

⁷ Tomografia da ionosfera é a técnica que representa a ionosfera como um conjunto de células (2D ou 3D), onde cada célula possui um valor de densidade de elétrons correspondente.
Fonte: Austen, Franke e Liu (1988).

Tsai e Tsai (2004) investigaram a recuperação dos perfis a partir de duas abordagens, a primeira utilizando valores calibrados de TEC e a segunda com o TEC obtido de perfis provenientes de dados de RO. Para o estudo foram utilizados dados reais e simulados, considerando a missão GPS/MET e o modelo IRI. Os resultados tanto com dados reais quanto simulados mostraram melhoria na performance do método proposto. Tsai, Cheng e Liu (2011) apresentaram um método de recuperação auxiliado por valores de densidade de elétrons provenientes do modelo TWIM⁸ (*TaiWan Ionospheric Model*). A principal limitação encontrada foi em relação à quantidade de perfis obtidos com a missão utilizada (COSMIC), que exigia dezenas de dias de dados para se obter distribuição espacial suficiente.

Na abordagem proposta por Yue, Schreiner e Kuo (2011) foi considerada a assimilação de STEC (*Slant Total Electron Content*) de uma ocultação para um modelo que representasse a variação horizontal da ionosfera. Essa proposta apresentou limitações em relação à baixa resolução horizontal dos dados de RO, apesar de, ainda assim, a proposta apresentar melhorias em relação ao método tradicional. Yue, Schreiner e Kuo (2012) buscaram utilizar assimilação de dados provenientes das ocultações e de estações GNSS, para auxiliar a recuperação dos perfis ionosféricos. Neste estudo foi observado que aproximadamente 700 ocultações bem distribuídas espacialmente seriam suficientes para melhorar a performance da inversa de Abel.

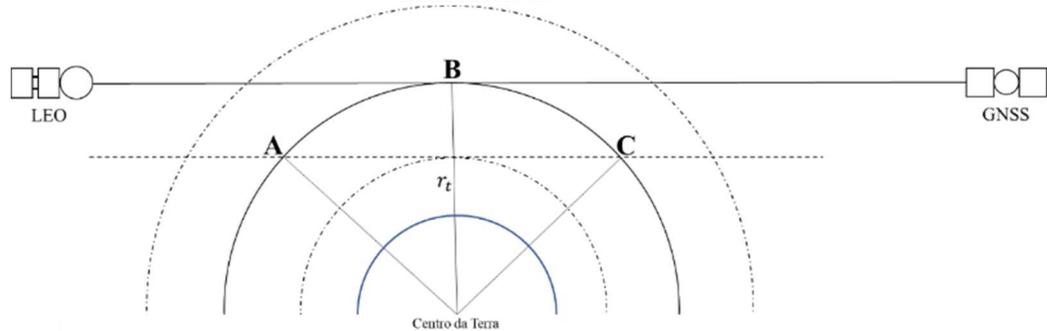
Em Yue, Schreiner e Kuo (2013) são utilizados valores de VTEC provenientes de mapas globais ionosféricos como dados auxiliares. A Figura 10 ilustra a visualização das camadas atmosféricas considerando simetria esférica. É possível verificar que considerando apenas a variação vertical da ionosfera, os pontos A e C apresentariam o mesmo valor de densidade de elétrons que o ponto B, considerando a inversa de Abel clássica. Pela representação fica evidente que a abordagem clássica resulta em erros significativos principalmente quando são consideradas grandes áreas, especialmente em regiões com alta variabilidade da densidade de elétrons. Para representar a variação horizontal da ionosfera, Yue, Schreiner e Kuo (2013) utilizaram os valores de VTEC das posições dos pontos tangentes e as projeções das posições do GPS e LEO correspondentes à mesma altitude para considerar a variação da densidade de elétrons. Assim, a partir da densidade de elétrons estimada no ponto tangente (n_{eB}) e dos valores de VTEC recuperados de modelos globais foi possível estimar a densidade de elétrons nos pontos A (n_{eA}) e C (n_{eC}) com:

⁸ TWIM é um modelo global ionosférico desenvolvido com dados da missão COSMIC.
Fonte: Tsai *et al.* (2009).

$$n_{eA} = n_{eB} \frac{VTEC_A}{VTEC_B}, \quad (52)$$

$$n_{eC} = n_{eB} \frac{VTEC_C}{VTEC_B}. \quad (53)$$

Figura 10 – Projeção da variação horizontal da densidade de elétrons considerando as camadas atmosféricas.



Fonte: Adaptado de Yue, Schreiner e Kuo (2013).

Para validação do método os autores utilizaram dados reais, com mapas globais provenientes de centros associados ao IGS (*International GNSS Service*), os IAACs (*IGS Ionosphere Associate Analysis Centers*), e simulados, a partir do modelo *NeQuick*⁹. Em ambos os casos foram obtidos resultados melhores que os provenientes da abordagem clássica. É ressaltada, no entanto, a importância da resolução dos mapas ionosféricos utilizados, para possibilitar uma melhor representação da variação horizontal da ionosfera e, conseqüentemente, melhorar a estimativa dos perfis recuperados.

Guo *et al.* (2015) apresentam uma comparação da versão clássica da inversa de Abel com duas abordagens, uma auxiliada por um modelo derivado de observações de RO e outra pelo modelo IRI. Conforme mencionado na Seção 3.4.1, quando se considera a ionosfera, o ângulo de refração é muito pequeno, podendo o TEC ser calculado considerando trajetória em linha reta. Para esta abordagem é utilizado o TEC absoluto (TEC_{Abs}), que corresponde ao TEC calibrado apresentado por Schreiner *et al.* (1999) (Figura 9), desconsiderando o valor do TEC não pertencente à região simétrica da ocultação. Após análises dos valores obtidos pelo TEC estimado, comparados com os provenientes do modelo IRI, os autores assumem um modelo que considera que a razão entre o TEC estimado assumindo simetria esférica (TEC_{mod}^{SE}) e o TEC estimado sem assumir simetria esférica (TEC_{mod}), a partir de um modelo, é aproximadamente o valor da razão entre o TEC considerando simetria esférica (TEC^{SE}) e o TEC absoluto estimado na ocultação (TEC_{Abs}). Com isso tem-se que:

⁹ *NeQuick* é o modelo ionosférico adotado pelo sistema Galileo.
Fonte: ESA navipedia (2019).

$$\frac{TEC^{SE}}{TEC_{Abs}} = \frac{TEC_{mod}^{SE}}{TEC_{mod}}. \quad (54)$$

Os valores de TEC_{mod}^{SE} são estimados a partir da densidade de elétrons proveniente de um modelo ionosférico, neste caso foi utilizado o modelo IRI, aplicando a inversa de Abel. Já os valores de TEC_{mod} são estimados a partir da integral da densidade de elétrons, considerando uma linha reta entre os satélites. A partir do valor estimado do TEC considerando simetria esférica (TEC^{SE}), obtido com a Equação (54), é possível estimar a densidade de elétrons com a inversa de Abel (Equação 45). Além do modelo IRI, no trabalho é proposto um modelo empírico, a partir de perfis de densidade de elétrons estimados por RO. Ambas as abordagens apresentam melhoria em relação ao método considerando a atmosfera esféricamente simétrica. Porém, limitações são destacadas principalmente em relação aos modelos adotados, em especial quando se consideram regiões com alta variação do gradiente eletrônico.

Pedatella, Yue e Schreiner (2015) apresentam um método para auxiliar a inversa de Abel a partir de um modelo gerado com valores de densidade máxima de elétrons na camada F₂ (NmF₂), obtidos a partir de observações da missão COSMIC. Os valores de NmF₂ são estimados utilizando a inversa de Abel padrão, e para cada modelo são considerados os valores obtidos com um mês de dados. Isso equivale a assumir que a estrutura da ionosfera é estacionária pelo período de um mês, essa condição é necessária devido ao volume de dados obtidos com distribuição suficiente para representar a ionosfera. Os autores destacam que com a missão COSMIC-2 espera-se que um período menor possa ser utilizado. As informações da variabilidade horizontal da ionosfera são utilizadas de forma semelhante ao método proposto por Yue, Schreiner e Kuo (2013), mas neste caso considerando que a variação da densidade de elétrons é proporcional à variação da densidade máxima de elétrons na camada F₂. Para o método é calculado um fator de assimetria (F_A) que é aplicado na inversa de Abel. Considerando a ionosfera esquematizada na Figura 10, o fator de assimetria é obtido para cada ponto tangente (B), sendo estimados os valores de NmF₂ para a posição do mesmo (NmF_{2B}) e também de dois pontos correspondentes às projeções do GNSS e do LEO à mesma altitude do ponto tangente, equivalentes aos pontos A (NmF_{2A}) e C (NmF_{2C}). O fator (F_A) então é obtido por:

$$F_A = \frac{NmF_{2A} + NmF_{2C}}{2NmF_{2B}}. \quad (55)$$

Conforme mencionado anteriormente, esta proposta ainda apresenta algumas limitações em relação à resolução temporal dos mapas utilizados, porém, seus resultados foram tão satisfatórios que constituíram uma nova opção de produto disponibilizado pela UCAR/CDAAC para dados da missão COSMIC. Os perfis são disponibilizados como *igaPrf*

(*ionosphere grid aided profile*) podendo ser utilizados em substituição aos perfis padrões, *ionPrf*, produtos *Level 2* (Apêndice C).

De forma análoga, Ram *et al.* (2016) desenvolveram um método de auxílio à inversa de Abel também considerando valores de densidade máxima de elétrons na camada F₂ (NmF₂) para representação da variação horizontal da ionosfera. No método, além de algumas propostas para simplificação computacional e aumento da velocidade de processamento, é proposta a utilização de mapas ionosféricos com uma janela de duas horas de dados, com os mesmos dados utilizados para a ocultação. São utilizados dados simulados com o modelo *NeQuick* como referência, sendo obtidas melhorias em relação ao método tradicional. Os autores destacam limitações observadas em relação à dependência da quantidade e distribuição das observações de RO, o que deve ser atenuado no futuro, com os lançamentos de novas missões. Além disso, ressalta-se que a abordagem proposta só foi possível com a utilização de dados simulados, uma vez que foi desenvolvida considerando número maior de ocultações do que é possível atualmente.

Chou *et al.* (2017) apresentam uma proposta semelhante à apresentada por Pedatella, Yue e Schreiner (2015) para a utilização da inversa de Abel. Neste caso, porém, são utilizados dados tridimensionais de densidade de elétrons provenientes da missão COSMIC, ao invés de dados bidimensionais de densidade máxima de elétrons na camada F₂ (NmF₂). A metodologia para inclusão de informação ionosférica é realizada de forma semelhante, com a diferença que o fator de assimetria (Equação 55) neste caso é calculado com dados tridimensionais. Os resultados do método proposto são comparados com os resultados de métodos utilizando informações de TEC e NmF₂. As três abordagens apresentaram melhorias em relação à inversa de Abel clássica. O método proposto apresentou os melhores resultados em altitudes superiores a 250 km, abaixo desse valor o método auxiliado por valores de NmF₂ apresentou melhor desempenho. A principal limitação observada nos métodos testados foi em relação à sensibilidade quanto às variações diárias da ionosfera. Verificou-se que em latitudes médias a diminuição observada na ionosfera no período noturno não foi bem representada pelas metodologias testadas, sendo que neste período, em altitudes entre 100 e 250 km, a inversa de Abel padrão apresentou melhor desempenho.

Todos esses trabalhos destacam a relevância e as limitações encontradas nos estudos relacionados à recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir de dados de RO. Além disso, fica evidente que a utilização da inversa de Abel auxiliada por dados suplementares que representem a variabilidade horizontal da ionosfera tem se mostrado uma abordagem promissora.

4 MAPAS IONOSFÉRICOS E SUA QUALIDADE NA REGIÃO BRASILEIRA

Os elétrons livres na atmosfera terrestre podem impactar significativamente a propagação de ondas de rádio, especialmente as da banda L, afetando aplicações baseadas em sistemas como o GNSS. Nos estudos da ionosfera, o efeito dos elétrons na propagação de ondas eletromagnéticas é, na maioria das vezes, baseado nas observáveis GNSS. Essas observáveis podem fornecer o número de elétrons ao longo da trajetória do sinal entre o receptor e o satélite. A densidade de elétrons ($N_e(\varphi, \lambda, a, t)$) é função da latitude φ , da longitude λ e da altitude a , em um tempo t específico. As observáveis GNSS fornecem informações sobre o STEC como a integral da densidade de elétrons no caminho entre as posições do transmissor e do receptor. Para realizar a modelagem da ionosfera e relacionar o STEC com o VTEC, em geral, um modelo de uma única camada (*Single-Layer Model* - SLM) é utilizado. Nesse modelo assume-se que todos os elétrons estão concentrados em uma camada esférica de espessura infinitesimal, cujo raio equivale a $H = R_e + h$, sendo h a altitude ionosférica acima da superfície da Terra esférica com raio R_e . Aplicando uma função de mapeamento ($M(z)$), relacionada ao ângulo zenital (z) para os valores de STEC, é possível obter os valores de $VTEC(\varphi, \lambda, t)$ (MANNUCCI ET AL., 1998; HERNÁNDEZ-PAJARES ET AL., 2009; DACH ET AL., 2015).

Desde 1998 diversos centros pertencentes aos IAACs do IGS têm desenvolvido métodos para a estimativa de valores de VTEC e fornecido esses dados por meio dos GIMs (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2009). Esses produtos são disseminados em formato IONEX (*IONosphere EXchange format*), consistindo em mapas de valores de VTEC fornecidos em *grids* regulares com resolução de $2,5^\circ \times 5^\circ$ em latitude e longitude, respectivamente, e resolução temporal de duas horas (SCHAER ET AL., 1998).

Nesta seção serão apresentados os estudos desenvolvidos em relação à avaliação da qualidade e formas de utilização dos mapas ionosféricos para a região brasileira. Na Seção 4.1 são apresentados os principais produtos disponíveis. A Seção 4.2 aborda uma metodologia de avaliação dos mapas globais a partir de dados de ionossondas. Na Seção 4.3 é investigado o impacto do uso das incertezas dos valores de VTEC, provenientes dos GIMs, na interpolação dos valores de VTEC, bem como no posicionamento GNSS. Por fim, na Seção 4.4 é conduzido um estudo sobre o desempenho de mapas globais, regionais e híbridos para a região brasileira, considerando dados de ionossonda e posicionamento GNSS.

4.1 MAPAS DISPONÍVEIS

O VTEC é um dos principais parâmetros para a descrição da ionosfera. Devido à sua importância, muito esforço vem sendo realizado nas últimas décadas para permitir a disponibilização desses parâmetros por meio dos GIMs. Atualmente, os IAACs que têm fornecido GIMs são o CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), ESA (*European Space Agency*), JPL, UPC (*Universitat Politècnica de Catalunya*), WHU (*Wuhan University*), CAS (*Chinese Academy of Science*), NRCan (*Natural Resources Canada*) e, mais recentemente, OPTIMAP/DGFI-TUM (*Operational Tool for Ionospheric Mapping And Prediction/Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut- Technische Universität München*) (FELTENS e SCHAER, 1998; ROMA-DOLLASE et al., 2017; GOSS et al., 2019; ERDOGAN, 2017).

Apesar de, em geral, os métodos de estimativa do VTEC serem baseados em observações GNSS, a qualidade de cada produto varia, dependendo principalmente dos modelos de processamento, da estimativa do DCB (*Differential Code Bias*) e demais especificações adotadas (ROMA-DOLLASE et al., 2017). Além dos mapas globais, também existem centros que disponibilizam mapas ionosféricos regionais (RIMs), como o INPE e o DGFI-TUM. Nesta seção são apresentados alguns dos principais mapas ionosféricos globais e regionais disponíveis, além de uma terceira possibilidade, os aqui denominados mapas híbridos.

4.1.1 Mapas globais

Os principais mapas ionosféricos globais são disponibilizados pelo CDDIS. O Quadro 3 apresenta as principais características do produto UQRG (produto rápido da UPC com resolução temporal de 15 minutos) e dos produtos finais disponibilizados pelos centros mencionados anteriormente.

Mais informações sobre os GIMs disponibilizados pelo CDDIS podem ser consultadas em Roma-Dollase (2017) e Hernández-Pajares et al. (2009; 2017). Além dos produtos finais, utilizados nos experimentos desenvolvidos na Seção 4.2, também foram avaliados os produtos rápidos de alguns centros, como ESA, UPC e WHU. No estudo desenvolvido na Seção 4.4, os produtos globais do DGFI-TUM também foram utilizados, sendo eles o OTHG e o OTLG. O produto OTHG é um mapa global de alta resolução, baseado em *B-splines* polinomial e trigonométrica. Mais informações sobre os produtos do DGFI-TUM podem ser obtidas em Goss et al. (2019; 2020) e Erdogan (2017; 2020).

Quadro 3 – Informações do UQRG e dos produtos finais disponibilizados pelo CDDIS.

GIM	Método	Estimativa do DCB	Data de início	Referências
IGSG	Média ponderada	Combinado	1998.4	Hernández-Pajares et al. (2009)
CODG	Harmônicos esféricos	Simultaneamente ao VTEC	1998.4	Schaer (1999)
ESAG	Harmônicos esféricos	Simultaneamente ao VTEC	1998.4	Feltens (2007)
JPLG	Modelo de três camadas	Simultaneamente ao VTEC	1998.4	Mannucci et al. (1998)
UPCG	Tomografia com <i>splines</i>	A partir do VTEC	1998.4	Hernández-Pajares et al. (1999)
UQRG	Tomografia com <i>kriging</i>	A partir do VTEC	2011	Orús et al. (2005)
CASG	Harmônicos esféricos e séries trigonométricas generalizadas	Simultaneamente ao VTEC	1998.4	Li et al. (2015)
EMRG	Harmônicos esféricos	Simultaneamente ao VTEC	1998.4	Ghoddousi-Fard (2014)
WHUG	Harmônicos esféricos e mínimos quadrados	Simultaneamente ao VTEC	1998.4	Zhang et al. (2013)

Fonte: Adaptado de Roma-Dollase et al. (2017).

4.1.2 Mapas regionais

Os mapas regionais podem ser fornecidos com resoluções espacial e temporal bastante distintas, dependendo do centro responsável pelo desenvolvimento dos mesmos. Entre os mapas disponíveis para a região brasileira, atualmente, tem-se os produtos do INPE e do SIRGAS (*Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*). Os RIMs do INPE vêm sendo desenvolvidos no contexto do projeto EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Especial) desde 2013. Os mapas são estimados utilizando a dupla diferença da fase da onda portadora e possuem resolução espacial de 2° x 2,5°, em latitude e longitude, e resolução temporal de 10 minutos. A área de cobertura dos mapas é, em latitude, de -60° a 20°, e, em longitude, de -90° a -30°. Mais detalhes dos mapas de VTEC do INPE podem ser consultadas em Takahashi et al. (2016).

Os mapas ionosféricos do SIRGAS, chamados SIRGAS-UNLP, são desenvolvidos na *Universidad Nacional de La Plata* (UNLP), centro oficial de análises ionosféricas do SIRGAS. Os mapas gerados possuem resolução espacial de 1° x 1°, em latitude e longitude, e resolução temporal de uma hora. Nestes mapas é aplicado o modelo LPIM (*La Plata Ionospheric Model*) (SIRGAS, 2021). A área de cobertura dos mapas é, em latitude, de -55° a 15°, e, em longitude, de -85° a -30°. Mais informações sobre os mapas do SIRGAS podem

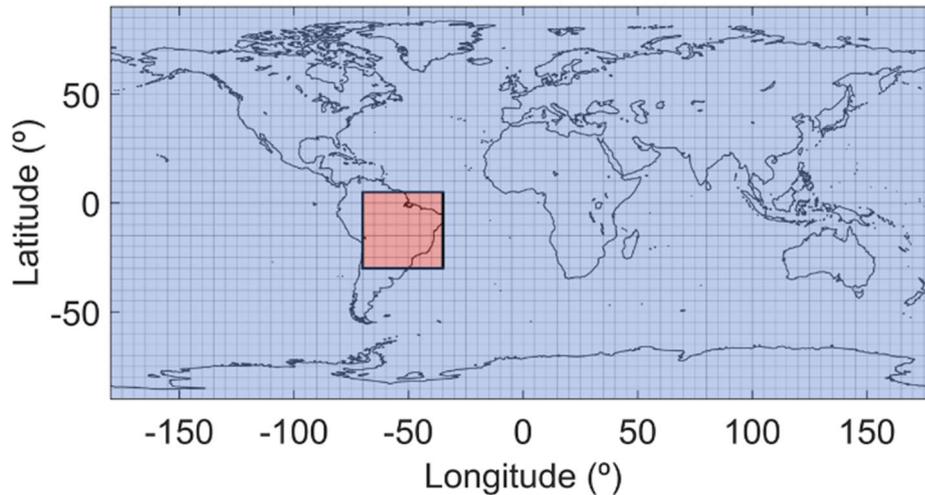
ser consultadas em Brunini et al. (2010). Os mapas do SIRGAS não foram utilizados nessa pesquisa devido ao período de dados disponíveis no site oficial.

Por meio de uma parceria com um pesquisador do DGFI-TUM, foi possível a aplicação da metodologia utilizada para mapas regionais de alta resolução da região da Europa para dados da região brasileira, com os produtos: OTHR e OVHR. Os mapas gerados para a região brasileira possuem resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, em latitude e longitude, e resolução temporal de 10 minutos. A área de cobertura dos mapas é, em latitude, de -30° a 5° , e, em longitude, de -70° a -35° . Mais detalhes sobre as metodologias aplicadas nos produtos regionais do DGFI-TUM podem ser consultados em Goss et al. (2020).

4.1.3 Mapas híbridos

Os mapas ionosféricos híbridos utilizados neste estudo não são produtos oficiais de nenhum centro. Durante o desenvolvimento do experimento que será apresentado na Seção 4.3, foi observado um comportamento atípico. Alguns produtos regionais com boa performance nas avaliações utilizando dados de ionossondas, tiveram seu desempenho degradado significativamente quando aplicados no posicionamento GNSS. A provável causa desse comportamento é a utilização pelo software de posicionamento dos valores nulos, correspondentes aos pontos do *grid* fora da área de cobertura dos mapas regionais, o que tem impacto ainda mais relevante em estações próximas às regiões de borda dos mapas. Para evitar esse problema, foram gerados produtos resultantes da combinação de mapas regionais e globais. Para a geração desses produtos, foi dada prioridade para os valores de VTEC dos mapas regionais, enquanto os demais valores do *grid* foram preenchidos com os valores provenientes de mapas globais novamente estimados para terem a mesma resolução (espacial e temporal) que os mapas regionais (resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ em latitude e longitude e temporal de 10 minutos). Esta aplicação foi realizada para os mapas OTHR (regional) e OTHG (global), ambos do DGFI-TUM, resultando nos produtos aqui chamados OTRG (Figura 11).

Figura 11 – Ilustração da origem dos dados do mapa OTRG, a partir dos dados do mapa OTHR (vermelho) e OTHG (azul).



4.2 AVALIAÇÃO DE MAPAS IONOSFÉRICOS

A avaliação da qualidade de modelos ionosféricos é normalmente baseada em comparações com valores de referência provenientes de modelos consolidados como IRI (KILIFARSKA e OUZOUNOV, 2001; ODEYENE et al., 2018; HU et al., 2019), de outros modelos globais (LIU et al., 2019; WANG et al., 2019, GOSS et al., 2020), dados de ionossondas (GARCIA-FERNANDEZ et al., 2005; HABARULEMA e SSESSANGA, 2016; PROL et al., 2018a) ou de valores de VTEC provenientes de altímetros¹⁰ e dados GNSS (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2017; ERDOGAN et al., 2020; ARAUJO-PRADERE et al., 2019). No caso dos GIMs, a maioria dos métodos de avaliação são baseadas na comparação com duas fontes complementares de dados de referência: medidas de VTEC proveniente de altímetros e a variabilidade do STEC obtidos a partir de estações GNSS independentes. Estudos anteriores relacionados à avaliação de GIMs considerando estas abordagens podem ser encontradas em Hernández-Pajares et al. (2017) e Roma-Dollase et al. (2017), em que puderam ser verificadas a qualidade e a consistência entre os mapas globais analisados.

Uma fonte complementar de avaliação que pode beneficiar os indicadores de qualidade da acurácia dos GIMs é utilização de medições de ionossondas como referência da ionosfera. A densidade de pico da camada F₂ (NmF₂) é comumente medida por ionossondas a partir das frequências críticas associadas (foF₂), que são especialmente confiáveis quando

¹⁰ Diversas missões de satélites com altímetros embarcados foram lançadas, em geral o objetivo dessas missões é o monitoramento dos oceanos, entre as missões estão a série Jason e TOPEX/Poseidon. Fonte: (EO PORTAL DIRECTORY, 2021d; 2021e).

manualmente estimadas (ARAUJO-PRADERE et al., 2019). Alguns estudos relacionados a estimativa da foF₂ podem ser encontrados em Altinay et al. (1997) e Pietrella e Perrone (2008).

Diversas investigações em relação à comparação do VTEC com a foF₂ foram desenvolvidas. Spalla e Ciarolo (1994) investigaram a calibração de medições de rotação *Faraday* utilizando a espessura equivalente da ionosfera¹¹. Neste trabalho, foi analisada a correlação entre o VTEC e a foF₂ com a limitação de se assumir espessura equivalente da ionosfera como constante. O estudo foi realizado considerando longos períodos durante a noite, longos o suficiente para amostra estatística, mas curto o bastante para evitar efeitos de longo período, causados pela variação da espessura equivalente.

Leitinger et al. (2004) apresenta uma análise da relação entre o VTEC e a foF₂ em cenários de comportamento regular e mudanças extremas, ressaltando a influência da espessura equivalente na estimativa do VTEC a partir da foF₂ e vice-versa, considerando latitudes médias. Kouris et al. (2004) apresentam um estudo sobre a variabilidade dos valores de VTEC e foF₂, em que foi verificada a clara correlação entre esses indicadores, especificamente considerando períodos de baixa e média atividade solar.

Cander (2007) apresenta um estudo correlacionando os valores de VTEC e foF₂ e utiliza os valores de foF₂ para prever valores de VTEC utilizando regressão linear. Em alguns trabalhos a relação entre VTEC e foF₂ é utilizada para realizar análises ionosféricas em abordagens globais (GERZEN et al., 2013) e regionais (KRANKOWSKI, SHAGIMURATOV e BARAN, 2007; SSESSANGA, MCKINNELL e HABARULEMA, 2014). Além desses estudos, a relação entre o VTEC e a foF₂ foi ainda utilizada para a melhoria de modelos climatológicos, mais informações podem ser obtidas em Habarulema e Ssessanga (2016) e Pignalberi et al. (2019). Apesar de diversos trabalhos sobre o assunto, ainda existe uma vasta gama de possibilidades de investigações e aplicações, especificamente em relação ao desenvolvimento de um método sistemático para a avaliação da qualidade de GIMs utilizando medidas de foF₂.

Assim, considerando a relevância dos métodos de avaliação dos GIMs e a consistência dos valores de foF₂ obtidos por medições de ionossondas, nesta seção foi desenvolvida uma nova forma de avaliação de GIMs. A metodologia desenvolvida é baseada na análise de quanto o VTEC, proveniente dos mapas ionosféricos, pode contribuir na

¹¹ A espessura equivalente da ionosfera (*slab thickness*) é a razão entre o TEC e a densidade máxima de elétrons na camada F₂, podendo ser definida como a amplitude efetiva da ionosfera, dependendo do formato real do perfil considerado.

Fonte: Spalla e Ciarolo (1994).

interpolação de medições diretas e manualmente estimadas de foF₂, considerando períodos e regiões com variabilidade da espessura equivalente da ionosfera. O método foi aplicado na região brasileira, considerando o pico do último ciclo solar (2014).

4.2.1 Metodologia

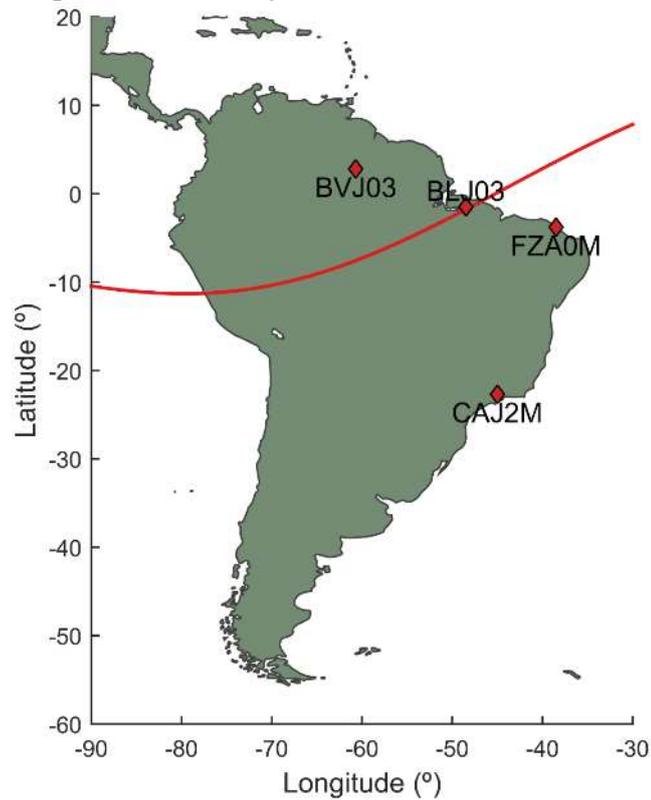
A avaliação dos GIMs foi realizada utilizando produtos ionosféricos disponíveis no CDDIS. Os mapas selecionados para este estudo são apresentados no Quadro 4. Todos os produtos utilizados são fornecidos em formato IONEX pelo IGS (CDDIS, 2020), com dois tempos de latência e, conseqüentemente, diferentes quantidades de receptores disponíveis: solução rápida (1 a 2 dias) e final (1 a 2 semanas). Mais informações sobre os GIMs podem ser obtidas em Hernandez-Pajares et al. (2009) e Roma-Dollase et al. (2017).

Quadro 4 – GIMs utilizados na avaliação.

Produto	Descrição
corg	Solução rápida (CODE)
codg	Solução final (CODE)
ehrg	Solução rápida com alta taxa, um mapa por hora (ESA)
esrg	Solução rápida (ESA)
esag	Solução final (ESA)
igr	Solução rápida (IGS)
igsg	Solução final combinada (IGS)
jplg	Solução final (JPL)
uprg	Solução rápida (UPC)
upcg	Solução final (UPC)
uqrg	Solução rápida com alta taxa, um mapa a cada 15 minutos (UPC)
whrg	Solução rápida (WHU)
whug	Solução final (WHU)

Dados de quatro ionossondas (Figura 12) do INPE foram utilizados: BVJ03 localizada em Boa Vista-RR (2.8° N, 60.7° O; latitude geomagnética: 12.9° N), SAA0K em São Luiz-MA (2.5° S, 44.3° O; latitude geomagnética: 0.8° S), FZA0M em Fortaleza-CE (3.8° S, 38.5° O; latitude geomagnética: 5.5° S) e CAJ2M em Cachoeira Paulista-SP (22.7° S, 45.0° O; latitude geomagnética: 16.4° S). Neste estudo, apenas dados de foF₂ manualmente estimados foram utilizados. Os dados dessas ionossondas estão disponíveis no contexto do programa EMBRACE/INPE (DENARDINI, DASSO e GONZALEZ-ESPARZA, 2016; EMBRACE, 2020). A resolução temporal dos dados é de 10 minutos.

Figura 12 - Localização das ionossondas utilizadas.



Para o método de validação proposto são utilizados pares de ionossondas. A variabilidade da foF_2 entre as estações utilizadas é considerada próxima da variabilidade do VTEC. O Quadro 5 apresenta os pares de ionossondas formados, bem como as distâncias correspondentes entre as estações envolvidas.

Quadro 5 – Seis combinações possíveis de pares de ionossondas e respectivas distâncias.

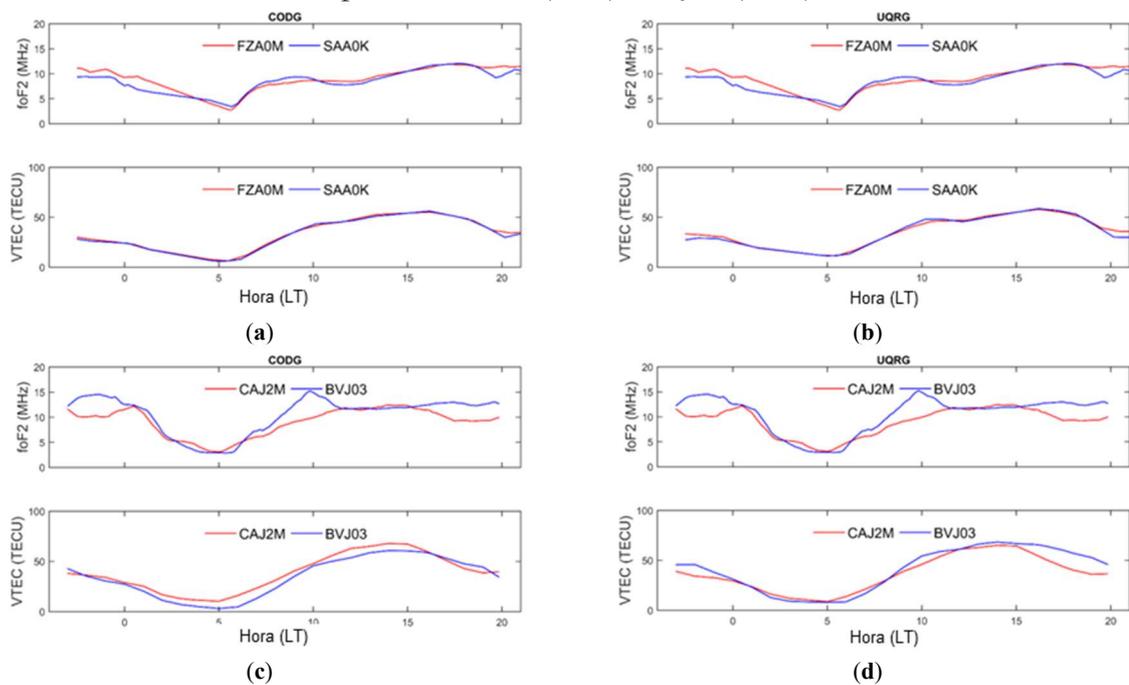
Pares de ionossondas	Distâncias (km)
FZA0M SAA0K	659,97
SAA0K BVJ03	1915,83
CAJ2M FZA0M	2215,02
CAJ2M SAA0K	2247,41
FZA0M BVJ03	2573,91
CAJ2M BVJ03	3307,93

O método foi aplicado para diferentes intervalos de tempo: uma semana, um ano e quatro anos. O primeiro estudo teve por objetivo selecionar a estratégia de interpolação com a melhor performance, para isso foram utilizados dados de uma semana de 2015, considerando os seis pares de ionossondas (Quadro 5) e todos os produtos com soluções rápida ou final (Quadro 4). No segundo experimento, após a seleção da melhor estratégia de interpolação, o estudo foi expandido para uma série temporal de um ano (2015), sendo novamente avaliados todos os GIMs utilizados anteriormente. O terceiro e último experimento

desta seção foi realizado com dois dos produtos com melhor desempenho na série temporal de 2015, CODG e UQRG, neste último experimento foi utilizada uma série temporal de quatro anos (2014-2017).

Conforme mencionado anteriormente, o método para avaliar a qualidade do VTEC é baseado na correlação entre a foF_2 e o VTEC (SPALLA e CIRAIOLO, 1994; LEITINGER et al., 2004; KOURIS et al., 2004). A Figura 13 apresenta o comportamento da foF_2 medida em dois pares de ionossondas e os respectivos valores de VTEC estimados utilizando dois GIMs (CODG e UQRG). Os valores apresentados correspondem ao dia 21 de 2015. Como pode ser verificado, nem todos os comportamentos específicos da foF_2 são bem representadas pelos valores de VTEC, porém, neste estudo se assume que a qualidade dessa representação depende do GIM utilizado.

Figura 13 – Comparação entre foF_2 medida com ionossondas e valores de VTEC estimados utilizando os produtos CODG (a e c) e UQRG (b e d).



No método proposto para avaliação de GIMs, os dados de uma ionossonda (Iono1) são estimados baseado nos dados de outra ionossonda do par considerado (Iono2). A variação do VTEC entre as posições das duas ionossondas é utilizada para transportar a foF_2 da ionossondas 2 para a posição da ionossonda 1. Deste modo, a foF_2 estimada pode ser comparada com o valor real de foF_2 medido na primeira ionossonda (Iono1), e assim, implicitamente, a qualidade do GIM pode ser avaliada em relação as medidas de foF_2 manualmente estimadas.

A avaliação do GIM foi baseada no erro médio quadrático (*Root Mean Square* - RMS) das diferenças entre os valores de foF₂ medidos na primeira estação (foF_{2_{Iono1}}) e os valores estimados com auxílio dos GIMs (foF_{2'_{Iono1}}):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(foF_{2'_{Iono1,i}} - foF_{2_{Iono1,i}} \right)^2}, \quad (56)$$

em que n é o total de valores estimados.

A avaliação considerou ainda o erro médio quadrático normalizado (*Normalized Root Mean Square* - NRMS):

$$NRMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{foF_{2'_{Iono1,i}} - foF_{2_{Iono1,i}}}{foF_{2_{Iono1,i}}} \right)^2} \cdot 100, \quad (57)$$

para confirmar os resultados obtidos. Como o comportamento dos erros obtidos foi o mesmo observado com o RMS, apenas os resultados com RMS serão apresentados. Além disso, foram calculadas as taxas de melhoria (TM):

$$TM = \frac{(foF_{2_{Iono1}} - foF_{2_{Iono2}}) - (foF_{2_{Iono1}} - foF_{2'_{Iono1}})}{(foF_{2_{Iono1}} - foF_{2_{Iono2}})}, \quad (58)$$

em que foF_{2_{Iono2}} representa a frequência crítica na camada F₂ medida na segunda ionossonda.

Duas equações foram utilizadas para fazer a interpolação da foF₂. A primeira baseada na razão simples entre os valores de frequência crítica e os valores de VTEC, ou seja, assumindo-se correlação linear:

$$foF_{2'_{Iono1}} = foF_{2_{Iono2}} \frac{VTEC_{Iono1}}{VTEC_{Iono2}}, \quad (59)$$

em que VTEC_{Iono1} e VTEC_{Iono2} correspondem aos valores de VTEC para as posições da primeira e da segunda ionossonda, provenientes dos GIMs.

A segunda abordagem é baseada na razão do quadrado da frequência crítica em relação aos valores de VTEC. Considerando a relação entre a frequência e o VTEC na estimativa do atraso ionosférico:

$$d_{Ion} = \frac{40.3}{f^2} VTEC, \quad (60)$$

assume-se implicitamente uma correlação entre o VTEC e a densidade de pico (NmF_2). Considerando a relação de primeira ordem entre NmF_2 e foF_2 (KELLEY, 2009), a segunda abordagem foi estimada a partir de:

$$foF_{2'iono1} = foF_{2iono2} \sqrt{\frac{VTEC_{iono1}}{VTEC_{iono2}}}. \quad (61)$$

Além das duas Equações mencionadas (59 e 61), também foi considerada a influência da utilização da hora local (*Local Time* - LT) para a comparação das observações em relação ao tempo de ocorrência, além do uso do tempo universal (*Universal Time* - UT). Deste modo, foram analisadas quatro abordagens, considerando a Equação (59), em LT e UT, e a Equação (61) em LT e UT.

No método proposto considerou-se que o comportamento da foF_2 é correlacionado ao VTEC, assumindo-se que a espessura equivalente da ionosfera seja constante. Uma limitação em decorrência disso é relacionada à utilização do método em regiões com significativa variabilidade da ionosfera e, conseqüentemente, diferentes valores de espessura equivalente da ionosfera nas regiões consideradas (SPALLA e CIRAIOLO, 1994; LEITINGER et al., 2004; KOURIS et al., 2004). Para analisar essa influência, na primeira etapa de avaliação, também foram estimados outros indicadores ionosféricos. Primeiramente foi analisada a espessura equivalente da ionosfera (τ) (TITHERIDGE, 1973):

$$\tau = \frac{VTEC}{NmF_2}, \quad (62)$$

em que NmF_2 representa a densidade máxima de elétrons na camada F_2 , e, na sequência, foi analisado o inverso da espessura equivalente da ionosfera (ou *shape function peak* - S_m):

$$S_m = \frac{NmF_2}{VTEC}, \quad (63)$$

que apresenta maior correlação espacial que os perfis de densidade de elétrons (HERNÁNDEZ-PAJARES, JUAN e SANZ, 2000).

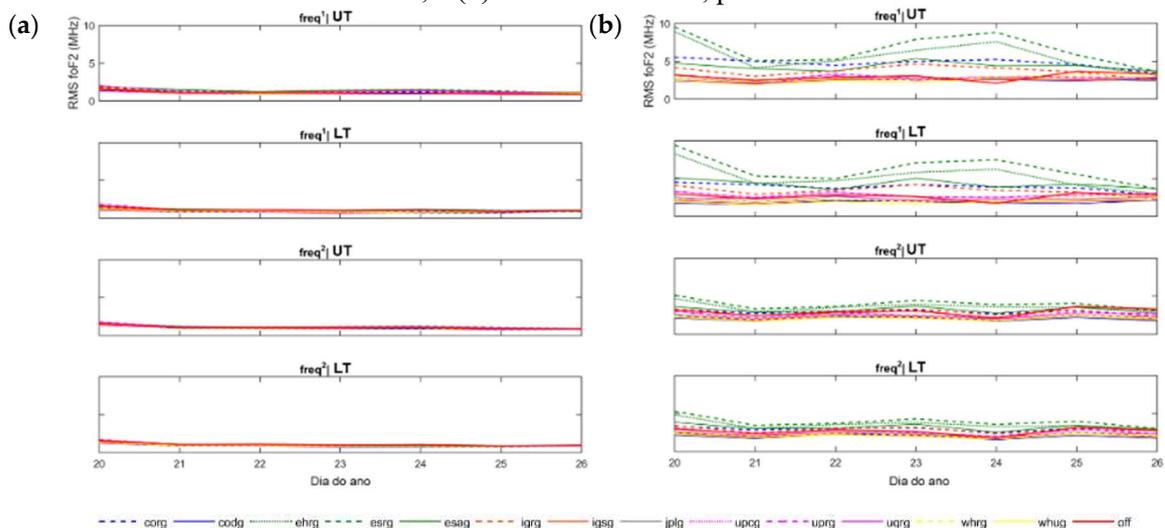
4.2.2 **Resultados e análises**

Os resultados são apresentados em três partes: a primeira, utilizada para a seleção da estratégia com melhor performance para o transporte das frequências críticas baseado nos valores de VTEC; a segunda, com análises de dados diários e semanais,

considerando a relação entre o erro e a época de ocorrência, bem como a distância das estações, nestas análises também foram considerados dois indicadores ionosféricos (espessura equivalente da ionosfera e *shape function peak*); e, na terceira e última parte, são apresentadas duas séries temporais, uma de um ano de dados (2015) considerando 13 GIMs e outra de quatro anos (2014-2017) considerando dois produtos (CODG e UQRG).

A Figura 14 apresenta o RMS das diferenças entre os valores de foF2 estimados e medidos pelas ionossondas para uma semana (20 a 26 de 2015), o que equivale a aproximadamente 980 medições por ionossonda. Cada plotagem representa os resultados de uma das estratégias adotadas, sendo a primeira correspondente à aplicação da Equação (59) (aqui chamada de freq^1) em UT, a segunda equivale à mesma equação em LT, a terceira equivale à Equação 61 (aqui chamada de freq^2) em UT e, por fim, a mesma equação em LT. As imagens em (a) são relacionadas ao par de ionossondas com a menor distância, enquanto as em (b) correspondem aos resultados do par mais distante.

Figura 14 - RMS das diferenças entre valores de foF2 medidos e estimados com auxílio dos GIMs considerando quatro estratégias e uma semana de dados: (a) FZA0M e SAA0K, par de ionossondas com a menor distância; e (b) CAJ2M e BVJ03, par com a maior distância.



Visualmente a influência da distância entre as ionossondas e o erro obtido pode ser verificada. Os resultados correspondentes à maior distância (b) apresentam maior magnitude e variabilidade. Além disso, é possível verificar que o uso da equação com o quadrado da frequência (Equação 61) apresentou melhor desempenho para ambos os pares. Quanto ao uso do tempo em UT ou LT, apenas por esta análise visual não é possível verificar de forma clara o melhor desempenho considerando o par com menor distância. Os resultados para os demais pares apresentaram comportamento semelhante. Para resumir os resultados obtidos e permitir a seleção da melhor estratégia considerando todos os cenários, a Tabela 1

apresenta o RMS médio das diferenças obtidas com cada um dos pares de ionossondas. Para facilitar a visualização, os valores de cada uma das quatro abordagens foram classificados do menor (cinza mais claro) para o maior (cinza mais escuro), considerando cada par de ionossonda e GIM utilizado. Por exemplo, considerando a primeira coluna da Tabela 1, correspondente ao par de ionossondas FZA0M e SAA0K, com CORG, 0,87 (cinza mais claro) é o menor valor entre as quatro estratégias empregadas, enquanto 1,17 (cinza mais escuro) é o maior valor. Para cada linha, o menor valor é destacado em itálico, indicando o GIM com melhor performance naquela configuração.

Tabela 1 – RMS médio (MHz) das diferenças entre valores medidos de foF2 e estimados com as quatro abordagens apresentadas (considerando GIMs) e a simples diferença entre os valores medidos nas duas ionossondas de cada par (*off*). Os resultados são correspondentes aos dias 20 a 26 de 2015.

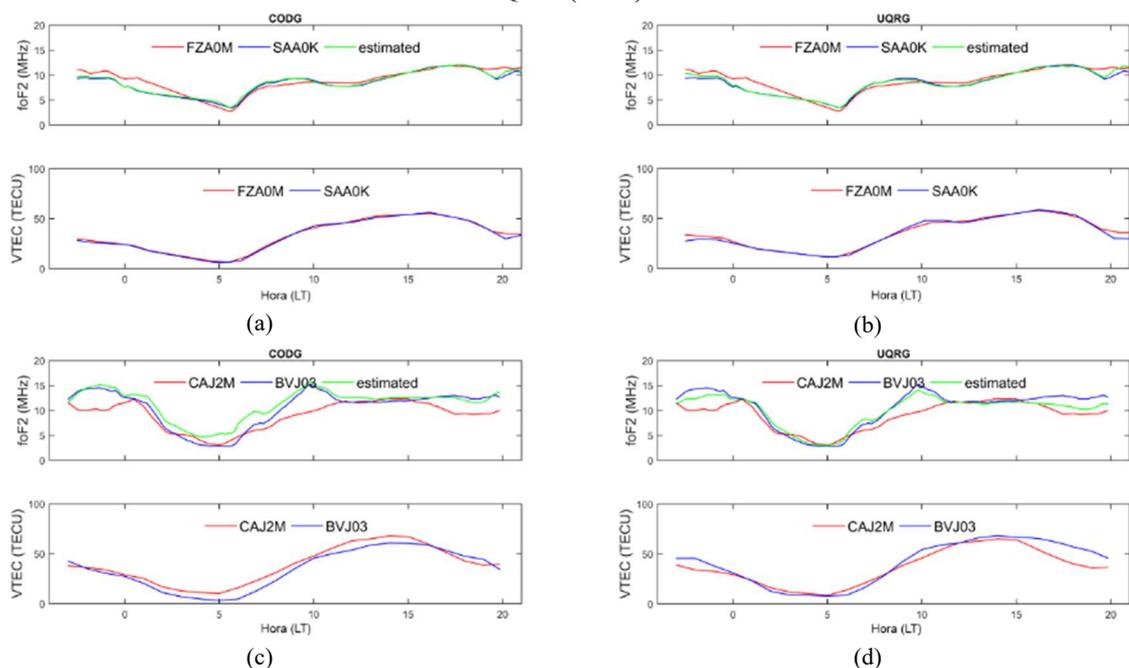
	Config	corg	codg	ehrg	esrg	esag	igr	igsg	jplg	upcg	uprg	uqrg	whrg	whug	off	
FZA0M_SAA0K	f ¹	UT	1.17	1.00	1.26	1.36	1.40	1.34	1.12	1.34	1.27	1.27	1.04	1.05	1.07	1.05
		LT	0.87	0.84	0.97	1.09	1.18	1.09	0.94	1.13	1.12	1.12	0.84	0.89	0.92	1.09
	f ²	UT	1.03	0.93	1.09	1.17	1.19	1.17	1.05	1.17	1.14	1.14	0.97	1.00	1.00	1.05
		LT	0.95	0.88	1.00	1.07	1.11	1.08	0.99	1.09	1.10	1.10	0.91	0.95	0.95	1.09
SAA0K_BVJ03	f ¹	UT	3.49	2.61	3.61	4.03	3.64	3.11	2.59	2.69	3.17	3.17	2.36	3.05	2.87	3.59
		LT	2.84	2.15	3.23	3.68	3.61	2.77	2.18	2.35	3.14	3.14	2.08	2.51	2.34	3.23
	f ²	UT	2.98	2.55	3.22	3.41	3.31	3.02	2.67	2.82	3.16	3.16	2.54	2.72	2.62	3.59
		LT	2.90	2.47	3.14	3.33	3.32	2.92	2.56	2.69	3.09	3.09	2.47	2.59	2.50	3.23
CAJ2M_FZA0M	f ¹	UT	1.61	1.32	2.38	2.82	2.45	2.17	1.46	1.98	1.76	1.76	1.77	1.72	1.72	1.78
		LT	1.61	1.27	2.30	2.66	2.26	2.06	1.38	1.86	1.74	1.74	1.69	1.51	1.51	1.80
	f ²	UT	1.49	1.27	1.77	1.97	1.81	1.75	1.42	1.63	1.64	1.64	1.46	1.41	1.40	1.78
		LT	1.51	1.30	1.78	1.96	1.80	1.76	1.43	1.63	1.65	1.65	1.45	1.38	1.37	1.80
CAJ2M_SAA0K	f ¹	UT	1.79	1.60	2.26	2.55	2.13	1.89	1.51	1.64	2.03	2.03	1.56	1.63	1.67	2.02
		LT	1.79	1.60	2.26	2.55	2.13	1.89	1.51	1.64	2.03	2.03	1.56	1.63	1.67	2.02
	f ²	UT	1.73	1.57	1.90	2.04	1.93	1.86	1.65	1.74	1.96	1.96	1.58	1.59	1.58	2.02
		LT	1.73	1.57	1.90	2.04	1.93	1.86	1.65	1.74	1.96	1.96	1.58	1.59	1.58	2.02
FZA0M_BVJ03	f ¹	UT	4.48	2.93	4.47	4.84	3.90	3.44	2.91	3.01	3.17	3.17	2.65	3.44	3.21	3.21
		LT	2.90	1.95	3.20	3.59	3.15	2.48	1.97	2.11	2.70	2.70	2.02	2.41	2.21	2.80
	f ²	UT	2.88	2.33	3.05	3.22	2.97	2.74	2.42	2.53	2.81	2.81	2.37	2.53	2.41	3.21
		LT	2.68	2.16	2.85	3.03	2.82	2.54	2.22	2.31	2.64	2.64	2.20	2.29	2.18	2.80
CAJ2M_BVJ03	f ¹	UT	4.74	2.45	5.68	6.55	4.31	3.67	2.47	2.61	2.89	2.89	2.61	2.82	2.47	2.95
		LT	3.88	1.87	5.23	6.22	4.28	3.38	2.02	2.28	2.88	2.88	2.41	2.28	1.96	2.65
	f ²	UT	2.92	1.99	3.57	3.94	3.22	2.87	2.14	2.34	2.59	2.59	2.26	2.21	2.04	2.95
		LT	2.89	1.95	3.52	3.90	3.21	2.82	2.10	2.28	2.63	2.63	2.28	2.19	2.02	2.65

Com esses resultados é possível verificar que a quarta abordagem apresentou os melhores resultados. Com isso, a estratégia adotada para os demais estudos sobre a avaliação de GIMs foi a razão entre o quadrado da frequência crítica e o VTEC (Equação 61) em hora local (LT). Foi observado que as maiores diferenças entre os resultados obtidos com a transformação para hora local foram observadas em estações com maior distância em longitude,

uma vez que esta correção é baseada na longitude da estação. Considerando-se, por exemplo, as estações CAJ2M e SAA0K, que apresentam longitudes similares ($45,0^\circ$ O e $44,3^\circ$ O), a correção em relação à hora local é a mesma, com isso, os resultados em UT e LT para este par foram os mesmos. Os resultados apresentados demonstraram ainda que CODG e UQRG apresentaram as melhores performances entre os produtos analisados.

A Figura 15 apresenta os valores de VTEC e valores estimados de foF₂ para as posições de dois pares de ionossondas. Os valores apresentados correspondem ao dia 21 de 2015. Novamente (a) e (b) são referentes ao par de ionossondas com menor distância, enquanto (c) e (d) são relacionados ao par com maior distância. As linhas verdes apresentam frequências críticas calculadas para a posição da ionossonda cujas medições são representadas com as linhas vermelhas, valores esses obtidos a partir dos dados medidos na segunda ionossonda (linhas azuis). Os gráficos da esquerda apresentam os dados obtidos com o CODG e os da direita com UQRG. A influência da distância entre as ionossondas pode ser observada tanto em relação aos valores de foF₂ quanto de VTEC. A influência do VTEC pode ser verificada, por exemplo, próximo ao horário das 10 h (LT) para o segundo par de ionossondas (CAJ2M e BVJ03), onde o valor de foF₂ medido na estação BVJ03 é maior que o da estação CAJ2M. Neste caso, verifica-se que o produto UQRG representou melhor a variabilidade da ionosfera, levando a um valor mais próximo de foF₂ em relação ao medido pela ionossonda.

Figura 15 – Comparação entre os valores de foF₂ medidos com as ionossondas e estimados com GIM e os valores de VTEC estimados com GIMs para cada ionossonda com os produtos CODG (a e c) e UQRG (b e d).



A Figura 16 apresenta as diferenças entre os valores estimados e medidos de foF₂ para um dia dos mesmos dois pares de ionossondas analisados anteriormente, com menor (a) e maior (b) distância. Para esse mesmo período, são apresentadas as diferenças entre os valores estimados de espessura equivalente da ionosfera (Figura 17) e *shape function peak* (Figura 18). Os resultados obtidos com o cálculo da foF₂ são correlacionados ao comportamento da ionosfera observado nos valores de espessura equivalente da ionosfera e da *shape function peak*. A *shape function peak* demonstrou ser um bom indicador para caracterizar a similaridade da ionosfera das regiões envolvidas. As diferenças obtidas para o par com menor (Figura 16-a) distância foram bem menores que o par com maior distância (Figura 16-b). Considerando os valores do primeiro par de ionossondas (Figura 16-a), a maior variabilidade das diferenças de foF₂ ocorre próximo às 0 h, 05 h e 20 h LT, períodos similares aos que podem ser verificadas maiores discrepância nos indicadores ionosféricos, espessura equivalente da ionosfera (Figura 17-a) e *shape function peak* (Figura 18-a).

A Figura 19-a apresenta os valores médios dos RMS das diferenças entre foF₂ estimados e medidos para uma semana de dados (020 a 026/2015) *versus* as distâncias entre as ionossondas. Com esses resultados é possível verificar o impacto da distância entre as ionossondas e o erro obtido na interpolação dos valores de foF₂. Vale destacar que a distância entre as ionossondas utilizadas não é o único fator de impacto nos resultados obtidos, o que fica claro com a ocorrência de erros menores em distâncias maiores, porém, é evidente esta influência. De maneira geral, quase todos os GIMs avaliados obtiveram melhor desempenho na interpolação dos valores de frequência crítica em relação à comparação direta dos valores medidos entre as ionossondas (representados em vermelho), mesmo quando grandes distâncias são consideradas.

Para verificar a influência da sazonalidade do conteúdo de elétrons da ionosfera, mais duas semanas foram analisadas de maneira análoga na Figura 19: (b) dias 166-172 de 2015, período de baixo conteúdo de elétrons; e (c) dias 288-294 de 2015, período de elevado conteúdo de elétrons. Os resultados indicaram que em períodos de menor intensidade do conteúdo de elétrons, o uso dos GIMs em todos os casos levou a melhores resultados que a comparação direta dos dados das ionossondas. Para o período de elevado conteúdo de elétrons, alguns produtos apresentaram desempenho pior que a comparação direta dos dados das ionossondas quando as maiores distâncias foram consideradas. De maneira geral, tanto em período de baixo, quanto de elevado conteúdo de elétrons, o uso dos GIMs proporcionou melhores resultados que a comparação sem interpolação.

Figura 16 – Diferenças entre valores de foF2 medidos nas ionosondas e estimados usando GIMs considerando dados de dois pares de ionosondas: (a) FZA0M e SAA0K; e (b) CAJ2M e BVJ03.

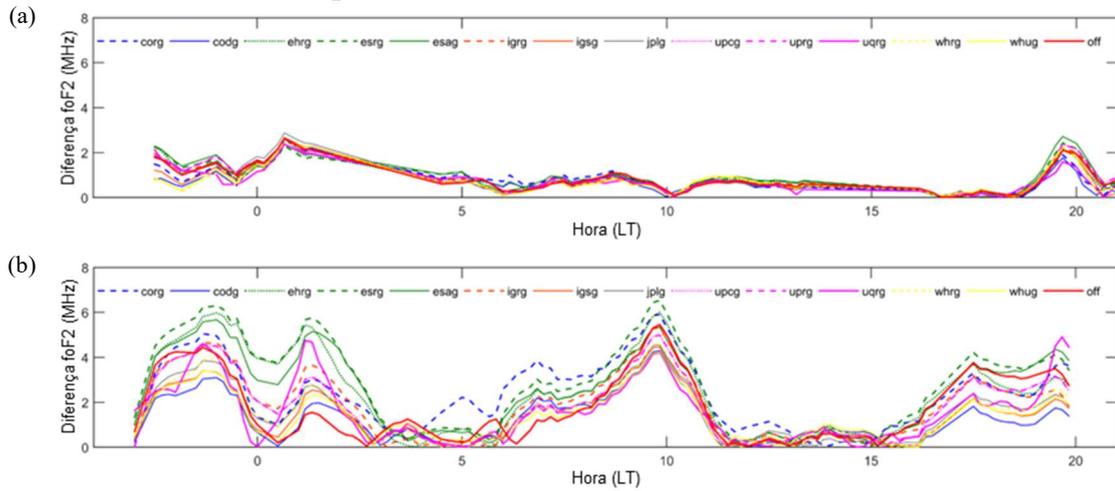


Figura 17 – Diferença de valores de espessura equivalente da ionosfera considerando dados de dois pares de ionosondas: (a) FZA0M e SAA0K; e (b) CAJ2M e BVJ03.

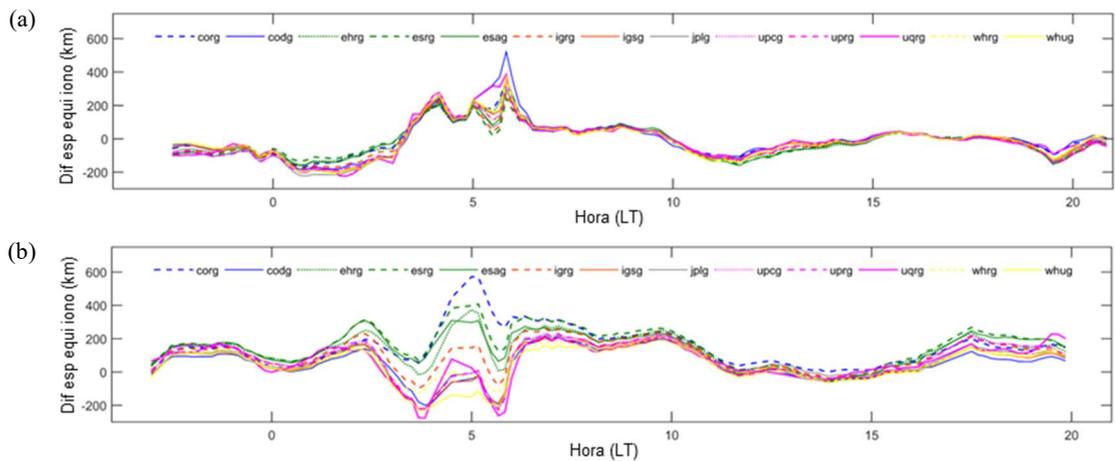


Figura 18 – Diferença de valores de *shape function peak* considerando dados de dois pares de ionosondas: (a) FZA0M e SAA0K; e (b) CAJ2M e BVJ03.

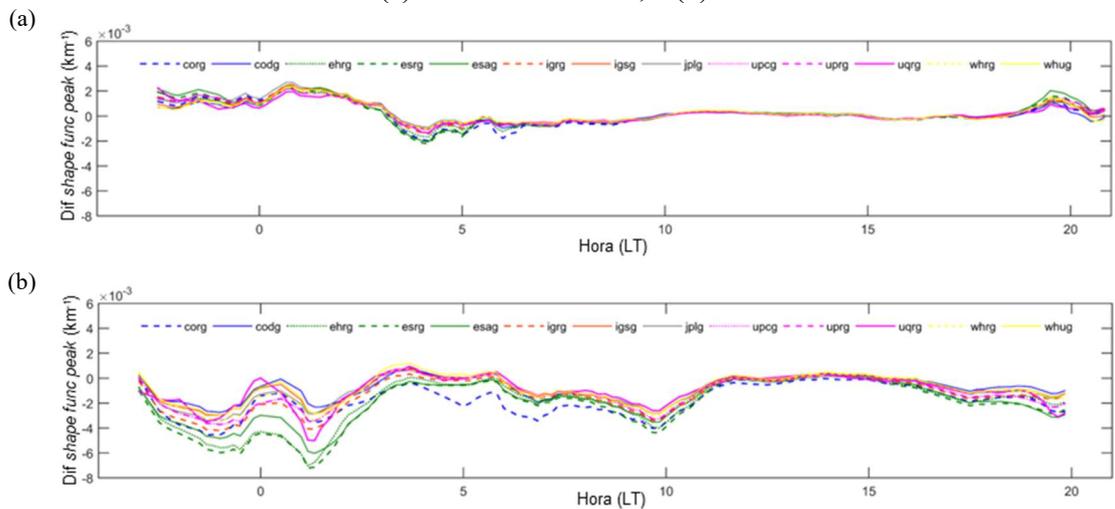
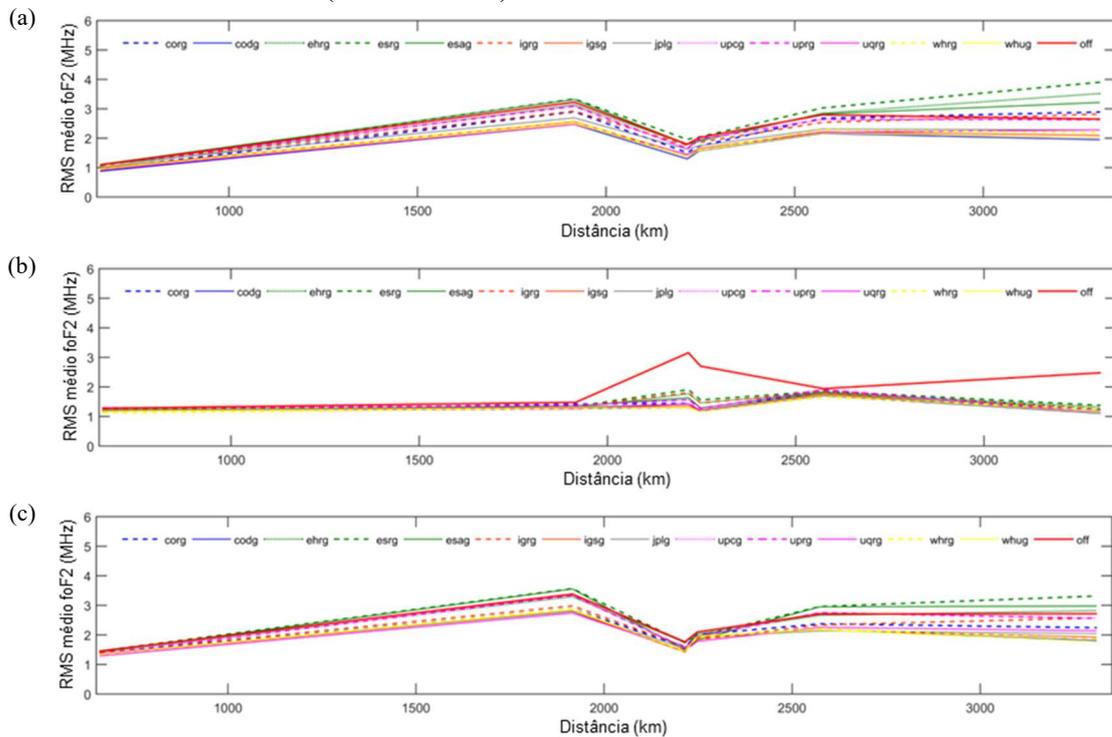


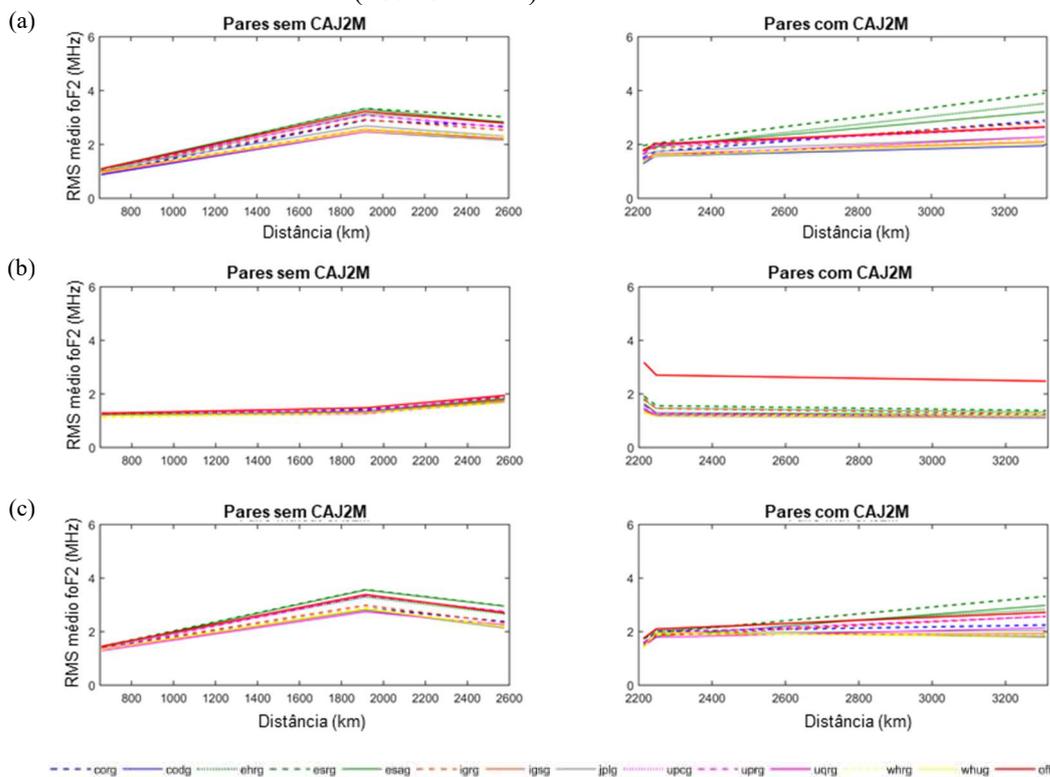
Figura 19 – RMS médio das diferenças entre os valores de foF2 medidos com as ionossondas e estimados utilizando GIMs *versus* as distâncias dos pares de ionossondas, considerando uma semana de dados: (a) semana teste (020-026/2015); (b) período de baixo (166-172/2015); (c) período de elevado (288-294/2015) conteúdo de elétrons na ionosfera.



A Figura 19 mostrou claramente que o erro obtido não depende apenas da distância entre as ionossondas, mas também de outros fatores, como a região das estações consideradas. Como pode ser observado na Figura 12, três ionossondas possuem latitudes semelhantes, e uma se encontra em região com latitude bastante diferente (CAJ2M). Assim, a Figura 20 apresenta os mesmos resultados analisados na Figura 19, porém, divididos em dois grupos: um com os pares formados com a ionossonda CAJ2M (direita); e outro entre as ionossondas em latitudes mais próximas (esquerda). Pode ser verificado que a influência da distância entre as ionossondas tem impacto diferente nos dois grupos. Considerando os pares em latitude semelhante (esquerda), o aumento do erro em relação às distâncias ocorre no período de baixo conteúdo de elétrons (Figura 20-b), já para o outro grupo, a relação direta com o aumento da distância acontece no período de elevado conteúdo de elétrons (Figura 20-c). Em relação ao primeiro grupo, a diminuição do erro ocorre entre as ionossondas FZA0M e BVJ03, o que pode estar relacionado à localização das estações. Vale ressaltar que a ionossonda SAA0K está localizada mais próxima ao equador geomagnético que as demais ionossondas, com isso, em períodos de mais elevado conteúdo total de elétrons a proximidade com o equador pode levar a mais significativas diferenças nas irregularidades e influência da ionosfera em comparação às outras duas ionossondas. Considerando os pares de estações em diferentes

latitudes (com CAJ2M), diversas são as fontes de influências envolvidas em regiões tão distintas, como assimetrias da EIA, variabilidade sazonal e taxas de recombinação. Além disso, vale destacar a melhoria significativa do uso dos GIMs no período de baixo conteúdo de elétrons considerando estações em diferentes latitudes, como o grupo com a ionossonda CAJ2M (Figura 20-b-direita).

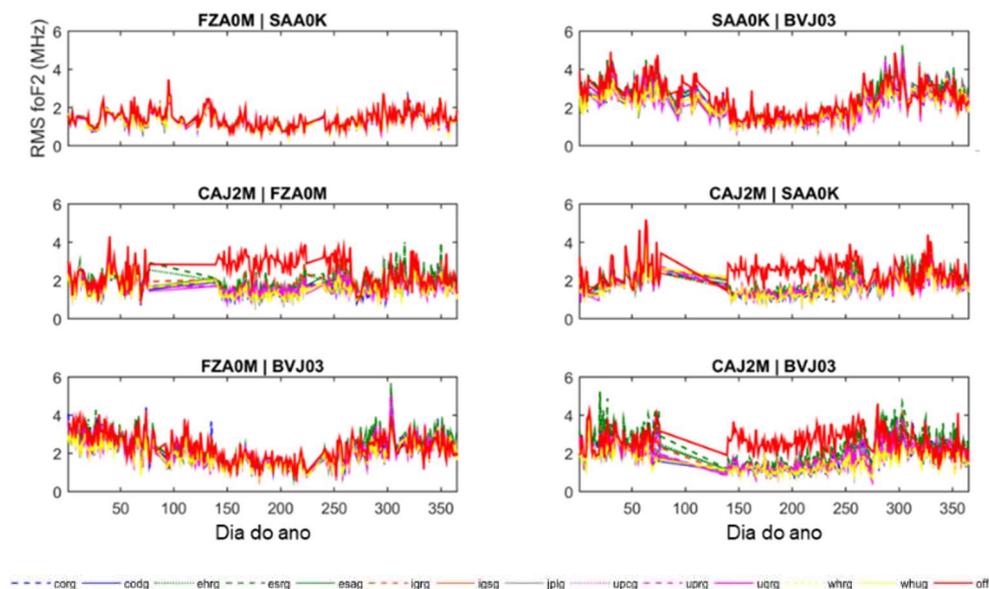
Figura 20 – RMS médio das diferenças entre os valores de foF2 medidos com as ionossondas e estimados utilizando GIMs *versus* as distâncias dos pares de ionossondas, considerando uma semana de dados divididos em dois grupos formados por ionossondas em latitudes similares (esquerda) e diferentes (direita): (a) semana teste (020-026/2015); (b) período de baixo (166-172/2015); (c) período de elevado (288-294/2015) conteúdo de elétrons na ionosfera.



Para as análises de series temporais, inicialmente foi considerado um ano de dados (2015), sendo avaliados todos GIMs selecionados. A Figura 21 apresenta o RMS das diferenças de foF₂ para os seis pares de ionossondas. De modo geral, pode ser verificada a influência sazonal no erro obtidos em todos os pares, com valores mais altos entre outubro e março, período de maior conteúdo de elétrons no hemisfério sul. Além disso, os três pares com a ionossonda CAJ2M apresentaram elevada melhoria com a aplicação do método de interpolação com GIM para o período de março a outubro. Vale ressaltar que, como mencionado anteriormente, CAJ2M é a ionossonda com maior distância em latitude das demais estações, com isso o comportamento da ionosfera apresenta menor similaridade com as demais regiões. Os resultados obtidos indicaram que no período de menor conteúdo de elétrons, o uso dos GIMs

levou a uma significativa melhoria na representação das diferenças das regiões consideradas, confirmando assim, o comportamento observado anteriormente (Figura 20-b) e, sendo este, o cenário em que o uso dos GIMs apresentou as melhorias mais significativas. Por outro lado, em períodos de elevado conteúdo de elétrons, o erro obtido nas estimativas com auxílio de GIMs ficou próximo aos valores obtidos com a simples diferença dos valores medidos diretamente pelas ionossondas.

Figura 21 – Valores de RMS das diferenças entre valores de foF_2 estimados com auxílio de GIMs e medidos para seis pares de ionossondas considerando 13 GIMs e um ano de dados (2015).



Os resultados indicam que, apesar de ser uma região cuja modelagem ionosférica é particularmente desafiadora, os GIMs são capazes de representar sua variabilidade quando períodos de baixo conteúdo de elétrons são considerados. No entanto, em períodos de elevado conteúdo de elétrons, a performance de alguns produtos pode não ser tão realística. Outra possível explicação para o comportamento neste período é relacionada ao aumento dos gradientes de densidade de elétrons, que influencia a foF_2 (medida local) de forma diferente com que afeta o VTEC (medições integradas). A diferença da influência sofrida pela foF_2 e o VTEC podem ser obtidas com a estimativa da espessura equivalente da ionosfera (Equação 62) que, neste método, é considerada constante. Com isso, uma pior performance do método era esperada quando regiões e períodos com significativa diferença nos gradientes eletrônicos são considerados. Mais detalhes da influência da espessura equivalente da ionosfera em relação à correlação da foF_2 com o VTEC podem ser encontradas em Spalla e Ciraolo (1994), Leitinger et al. (2004) e Kouris et al. (2004). Em relação à performance geral dos GIMs, vale ressaltar a consistência observada entre os produtos utilizados, apresentando comportamento similar em

diferentes períodos, em específico quando produtos finais são considerados, esse desempenho está de acordo com o observado em outros métodos de avaliação de GIMs (ROMA-DOLLASE et al., 2017).

A Tabela 2 sintetiza os resultados apresentados com os valores médios de RMS para o ano de 2015 considerando cada GIM, destacados em azul os erros mais baixos e em vermelho os maiores erros. Na Tabela 3 são apresentadas as porcentagens das taxas de melhoria em relação à simples diferença dos valores medidos pelas ionossondas, sem a interpolação proveniente dos GIMs. Os produtos com as melhores taxas de melhoria são destacados em azul e as piores em vermelho. As menores taxas de melhoria foram observadas no par de ionossondas com a menor distância e as maiores no par com maior distância. Isso indica a relevância da representação da variabilidade da ionosfera, especialmente quando grandes distâncias são consideradas. As análises considerando RMS normalizado (NRMS) apresentaram o mesmo comportamento dos resultados obtidos com RMS, confirmando as análises realizadas.

Tabela 2 – RMS médio das diferenças entre valores de foF₂ medidos e estimados com GIMs e a simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas (off) considerando um ano de dados (2015).

Pares de ionossondas	corg	codg	ehrg	esrg	esag	igr	igsg	jplg	upcg	uprg	uqrg	whrg	whug	off
FZA0M_SAA0K	1.35	1.30	1.39	1.40	1.38	1.38	1.32	1.35	1.38	1.37	1.30	1.31	1.31	1.42
SAA0K_BVJ03	2.23	2.04	2.26	2.39	2.44	2.16	2.04	2.06	2.33	2.28	1.93	2.09	2.05	2.48
CAJ2M_FZA0M	1.73	1.52	1.95	2.03	1.84	1.89	1.58	1.69	1.74	1.73	1.58	1.58	1.55	2.48
CAJ2M_SAA0K	1.76	1.63	1.91	1.99	1.85	1.86	1.67	1.71	1.83	1.80	1.63	1.69	1.68	2.50
FZA0M_BVJ03	2.21	1.97	2.20	2.32	2.33	2.09	1.96	1.98	2.21	2.17	1.92	1.98	1.95	2.33
CAJ2M_BVJ03	2.03	1.54	2.21	2.46	2.25	2.04	1.63	1.69	1.95	1.93	1.66	1.65	1.57	2.67

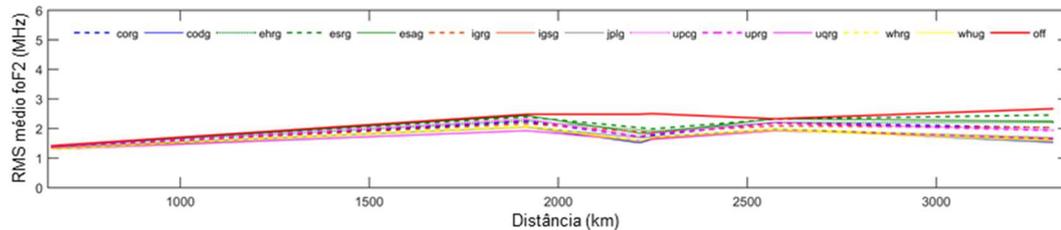
Tabela 3 – Taxas de melhoria do RMS médio das diferenças entre valores de foF₂ medidos e estimados com GIMs em relação à simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas considerando um ano de dados (2015).

Ionossondes pair	corg	codg	ehrg	esrg	esag	igr	igsg	jplg	upcg	uprg	uqrg	whrg	whug
FZA0M_SAA0K	5%	8%	2%	1%	3%	3%	7%	5%	3%	4%	8%	8%	8%
SAA0K_BVJ03	10%	18%	9%	4%	2%	13%	18%	17%	6%	8%	22%	16%	17%
CAJ2M_FZA0M	30%	39%	21%	18%	26%	24%	36%	32%	30%	30%	36%	36%	38%
CAJ2M_SAA0K	30%	35%	24%	20%	26%	26%	33%	32%	27%	28%	35%	32%	33%
FZA0M_BVJ03	5%	15%	6%	0%	0%	10%	16%	15%	5%	7%	18%	15%	16%
CAJ2M_BVJ03	24%	42%	17%	8%	16%	24%	39%	37%	27%	28%	38%	38%	41%

Na Figura 22 são apresentados os valores de RMS médio para cada produto em 2015 *versus* as distâncias dos pares de ionossondas. Os resultados apresentam um aumento do erro obtido com o aumento da distância entre as ionossondas. Neste caso, porém, mesmo os produtos com pior desempenho, apresentaram resultados melhores na estimativa da frequência crítica, se comparados à diferença direta entre os valores medidos pelas ionossondas. Esses resultados confirmam o que foi observado anteriormente com uma semana de dados e mostra

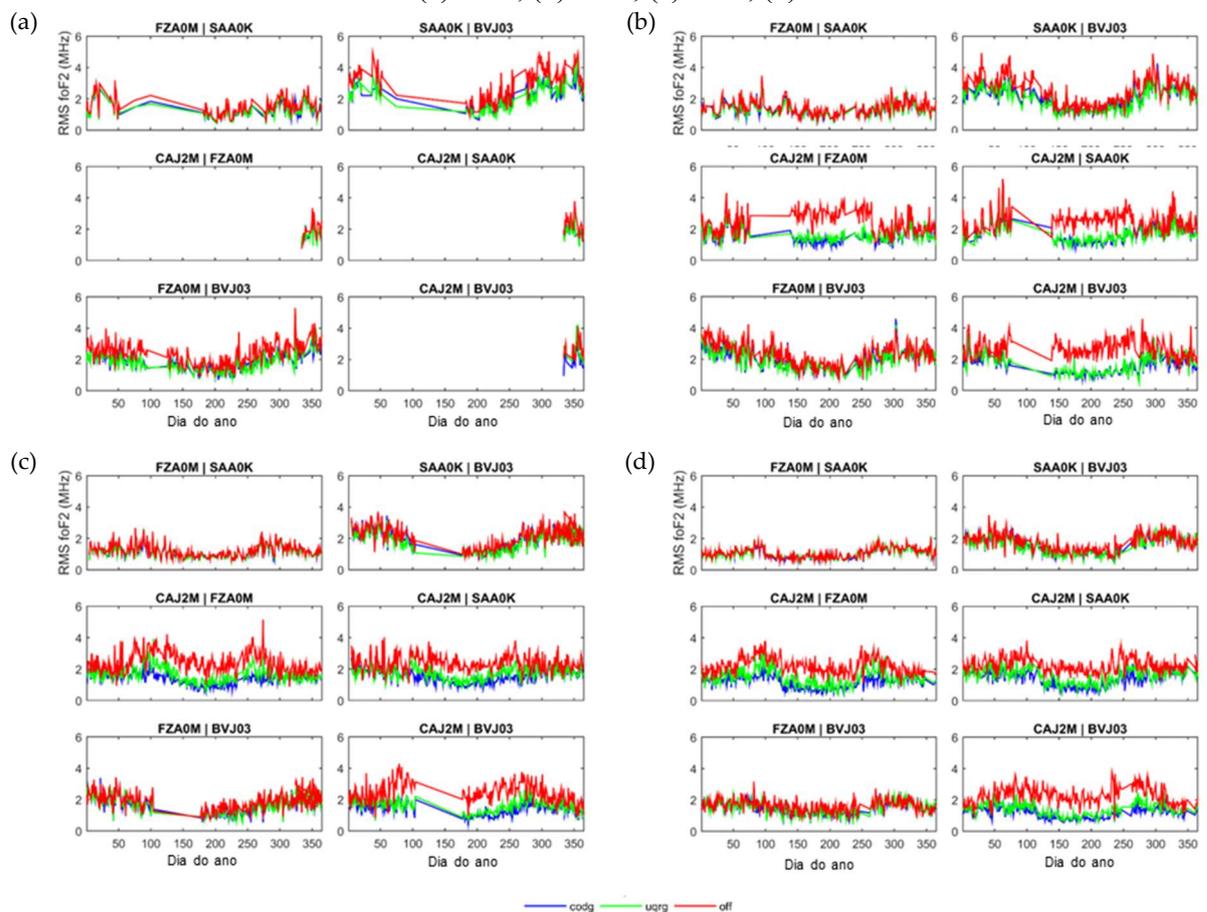
que, em média, os resultados com GIM apresentaram uma performance melhor que a comparação direta das medições de ionossondas.

Figura 22 –RMS médio das diferenças de valores de foF2 medidos nas ionossondas e estimados utilizando GIMs *versus* as distâncias entre os pares de ionossondas para um ano de dados (2015).



Os produtos que apresentaram o melhor desempenho foram CODG, IGSG, JPLG, UQRG, WHRG e WHUG (Tabela 2). Desses, foram selecionados os dois melhores (CODG and UQRG) para as análises com série temporal de quatro anos (Figura 23): 2014 (a), 2015 (b), 2016 (c), and 2017 (d).

Figura 23 – Valores de RMS das diferenças entre os valores de foF₂ estimados com auxílio de GIMs e medidos para seis pares de ionossondas considerando dois GIMs (CODG e UQRG) e quatro anos de dados: (a) 2014; (b) 2015; (c) 2016; (d) 2017.



Todas as análises realizadas para 2015 com os 13 produtos são observadas nos demais anos para os produtos CODG e UQRG, exceto para os pares formados com a ionossonda CAJ2M em 2014, devido à ausência de dados em grande parte deste ano. Além disso, com a série de quatro anos, é possível verificar a influência do pico do ciclo solar. Os maiores erros ocorreram próximo ao pico do ciclo, ocorrido entre 2013 e 2014, os demais resultados mostram um decréscimo na magnitude dos erros obtidos conforme os dados se distanciam desse período.

A Tabela 4 apresenta os valores médios dos RMS e a Tabela 5 as porcentagens das taxas de melhoria em relação à comparação com a simples diferença dos valores medidos pelas ionossondas. Em geral, como observado com os resultados de 2015, os valores mais baixos foram obtidos com os pares de ionossondas mais próximos e em latitudes semelhantes. Já as taxas mais altas foram observadas com o par mais distante, sendo também um par formado por ionossondas em latitudes distantes.

Tabela 4 – RMS médio das diferenças entre valores de foF₂ medidos e estimados com dois GIMs (CODG e UQRG) e a simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas (off) considerando quatro anos de dados (2014-2017).

Ionossondes pair	2014			2015			2016			2017		
	codg	uqrg	off									
FZA0M_SAA0K	1.31	1.31	1.53	1.30	1.30	1.42	1.14	1.14	1.23	1.03	1.04	1.09
SAA0K_BVJ03	2.21	2.16	2.97	2.04	1.93	2.48	1.93	1.82	2.12	1.59	1.55	1.76
CAJ2M_FZA0M	1.69	1.71	1.94	1.52	1.58	2.48	1.37	1.61	2.42	1.17	1.45	2.21
CAJ2M_SAA0K	1.81	1.79	2.30	1.63	1.63	2.50	1.53	1.70	2.37	1.38	1.58	2.26
FZA0M_BVJ03	1.87	1.83	2.38	1.97	1.92	2.33	1.74	1.72	1.91	1.46	1.49	1.65
CAJ2M_BVJ03	2.05	2.54	2.71	1.54	1.66	2.67	1.37	1.57	2.42	1.17	1.36	2.28

Tabela 5 – Taxas de melhoria do RMS médio das diferenças entre valores de foF₂ medidos e estimados com dois GIMs (CODG e UQRG) em relação à simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas considerando quatro anos de dados (2014-2017).

Ionossondes pair	2014		2015		2016		2017	
	codg	uqrg	codg	uqrg	codg	uqrg	codg	uqrg
FZA0M_SAA0K	14%	14%	8%	8%	7%	7%	6%	5%
SAA0K_BVJ03	26%	27%	18%	22%	9%	14%	10%	12%
CAJ2M_FZA0M	13%	12%	39%	36%	43%	33%	47%	34%
CAJ2M_SAA0K	21%	22%	35%	35%	35%	28%	39%	30%
FZA0M_BVJ03	21%	23%	15%	18%	9%	10%	12%	10%
CAJ2M_BVJ03	24%	6%	42%	38%	43%	35%	49%	40%

Como observado nos valores de RMS versus distância (Figura 22), as taxas de melhoria não apresentam um comportamento constante em relação à distância. Considerando a proximidade com o pico do ciclo solar, não foi possível verificar um padrão claro de melhoria para todos os pares. Por exemplo, para o par mais próximo, as taxas de melhoria diminuem com os dados mais distantes do pico, já com o par mais distante, as taxas

tendem a aumentar. Em geral, os pares com ionossondas com diferentes latitudes (CAJ2M_FZA0M, CAJ2M_SAA0K e CAJ2M_BVJ03) tendem a apresentar aumento nas taxas de melhoria nos períodos mais distantes do pico do ciclo solar. Enquanto os pares de ionossondas com latitudes mais semelhantes (FZA0M_SAA0K, SAA0K_BVJ03 e FZA0M_BVJ03) tendem a apresentar um decréscimo nas taxas de melhoria nos períodos mais distantes do pico.

4.2.3 Considerações sobre a avaliação de mapas ionosféricos

Nesta seção foi desenvolvido um novo método para a avaliação de GIMs a partir da análise do seu uso para auxiliar a interpolação de medidas diretas de foF2 manualmente estimadas. O método foi aplicado em um total de quatro anos de dados, considerando diferentes períodos e abordagens e um dos cenários mais desafiadores em estudos ionosféricos: região de baixa latitude e período próximo ao pico do ciclo solar.

A performance dos diferentes GIMs apresentou consistência, especialmente considerando os produtos finais. Os maiores erros e menores taxas de melhoria foram obtidos com soluções rápidas. A consistência entre os GIMs também foi observada em avaliações anteriores, como a desenvolvida por Roma-Dollase et al. (2017). Em relação à performance na região brasileira, as mais significativas melhorias ocorreram no período de baixo conteúdo de elétrons, considerando pares de ionossondas distantes em latitude. O pior desempenho em períodos de elevado conteúdo de elétrons pode estar relacionado à uma limitação do método, ao se considerar períodos ou regiões cuja espessura equivalente da ionosfera nas estações envolvidas são muito diferentes. Este comportamento está em acordo com o observado por Spalla and Ciraolo (1994), Leitinger et al. (2004), and Kouris et al. (2004).

Muitos esforços vêm sendo feitos para a modelagem e monitoramento da ionosfera, especialmente pelo seu impacto nas atividades relacionadas ao GNSS. Muitos métodos de avaliação se baseiam em dados de ionossonda, o que pode ser particularmente desafiador quando um número limitado de ionossondas está disponível, especialmente quando se consideram regiões com intensa variabilidade ionosférica. Deste modo, o método proposto pode ser também uma abordagem alternativa para a avaliação de modelos ionosféricos, por meio do uso de dados de ionossonda auxiliados por GIMs, ao invés da utilização direta das medidas obtidas com as ionossondas. Uma limitação observada no método foi em relação a períodos e regiões com significativa variação do comportamento da ionosfera. Uma possível melhoria no método proposto seria a inclusão da espessura equivalente da ionosfera na equação

da interpolação ou uma filtragem dos períodos em que o método deve ser aplicado. Detalhes e análises adicionais podem ser consultadas em Jerez et al. (2020a), o método também foi divulgado em Jerez et al. (2021a). A proposta desta metodologia surgiu com a necessidade de se obter formas de avaliação de informações dos perfis de RO. Alguns testes iniciais foram realizados em Jerez et al. (2020b), onde foi verificada a necessidade da elaboração de um estudo sistemático da qualidade dos GIMs para esse tipo de aplicação. Posteriormente, o método foi empregado para a avaliação de dois produtos ionosféricos da missão COSMIC (*ionPrf* e *igaPrf*) em Jerez et al. (2021c).

4.3 INTERPOLAÇÃO DE MAPAS IONOSFÉRICOS

Em geral, os GIMs são fornecidos com resolução espacial de $2.5^\circ \times 5^\circ$ (latitude x longitude) e resolução temporal de duas horas. O cálculo da correção ionosférica para aplicação dos GIMs necessita de uma interpolação dos valores fornecidos no *grid* para o IPP (*Ionospheric Pierce Point*) específico da observável a ser corrigida. A acurácia da interpolação está diretamente relacionada à resolução temporal dos mapas. Além dos valores de VTEC, os desvios padrão correspondentes, apresentados como ‘RMS’ no formato IONEX, também são disponibilizados pela maior parte dos GIMs. Entretanto, na equação original de interpolação do VTEC apresentada por Schaer et al. (1998), o desvio padrão do VTEC não é considerado. A utilização das incertezas dos valores de VTEC pode ser uma alternativa para os métodos de interpolação, com isso, os valores obtidos não dependem apenas do inverso da distância do ponto de interesse ao *grid*, mas também da qualidade dessas informações.

Como mencionado na seção anterior, as avaliações dos GIMs no domínio da ionosfera são geralmente baseadas na comparação de duas fontes de dados de referência complementares: VTEC obtido com altímetros e a variabilidade do STEC proveniente de estações independentes (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2017; ROMA-DOLLASE et al., 2017; HO et al., 1997, ERDOGAN et al., 2020). Outros métodos de avaliação, além dos já citados, incluem medições obtidas em embarcações (LUO et al., 2017; WANG et al., 2019), variabilidade dos DCBs (ROVIRA-GARCIA et al., 2016) e a partir de dados de ionosondas (PROL et al., 2018a; JEREZ et al., 2020a). Outra possibilidade de avaliação de modelos ionosféricos é no domínio do posicionamento. Diversos estudos se utilizaram desta abordagem para verificar a qualidade de diferentes metodologias de estimativa dos mapas de VTEC, seja em nível global (ORÚS-PEREZ, 2016; ZHANG et al., 2019; ROVIRA-GARCIA et al., 2020; WANG et al., 2020a) ou regional (PROL et al., 2018b; TOMASZEWSKI et al., 2020; WANG

et al., 2020b). Para essas aplicações, em geral, o posicionamento por ponto preciso (PPP) é utilizado com algumas diferenças nas estratégias de processamento empregadas, como as observáveis utilizadas, a estimativa do DCB e os modelos de estimativa do atraso da atmosfera neutra.

Neste contexto, foi realizada uma dupla avaliação do impacto das incertezas do VTEC fornecidas pelos GIMs no cálculo da correção ionosférica. Primeiramente foi avaliado um método de interpolação do VTEC baseado no inverso da distância com ponderação baseada nos valores de RMS fornecidos nos GIMs. As análises consideraram abordagens globais e regionais de avaliação. Na sequência, foi analisado o impacto das incertezas do VTEC diretamente no posicionamento GNSS. Para esta etapa, a região brasileira foi selecionada para os testes, considerando regiões com diferentes características ionosféricas.

4.3.1 Metodologia

Os mapas de $VTEC(\varphi_j, \lambda_k, t_i)$ e $RMS(\varphi_j, \lambda_k, t_i)$ são fornecidos em *grids* regulares de $j = 1, \dots, J$ latitudes ($\varphi_j = -90^\circ + (j - 1) \cdot \Delta\varphi$) com amostragem de $\Delta\varphi = 180^\circ / (J - 1)$ e $k = 1, \dots, K$ longitudes ($\lambda_k = 0^\circ + (k - 1) \cdot \Delta\lambda$) com amostragem de $\Delta\lambda = 360^\circ / K$ em um sistema de coordenadas geocêntrico e em épocas consecutivas ($t_i + \Delta t$) com resolução temporal de Δt . Utilizando uma interpolação bilinear, de acordo Schaeer et al. (1998), os valores de $VTEC(\varphi, \lambda, t_i)$ em uma posição arbitrária $P(\varphi = \varphi_j + p\Delta\varphi, \lambda = \lambda_k + q\Delta\lambda)$ com $0 \leq p \leq 1$ e $0 \leq q \leq 1$ podem ser calculados como:

$$\begin{aligned} VTEC(\varphi_j + p\Delta\varphi, \lambda_k + q\Delta\lambda, t_i) &= (1 - q) \cdot (1 - p) \cdot VTEC(\varphi_j, \lambda_k, t_i) + \\ q(1 - p) \cdot VTEC(\varphi_j, \lambda_k + \Delta\lambda, t_i) &+ (1 - q) \cdot p \cdot VTEC(\varphi_j + \Delta\varphi, \lambda_k, t_i) + \\ q \cdot p \cdot VTEC(\varphi_j + \Delta\varphi, \lambda_k + \Delta\lambda, t_i), & \end{aligned} \quad (64)$$

utilizando os quatro valores de VTEC mais próximos. Uma interpolação semelhante pode ser realizada com os mapas de RMS, obtendo-se o $RMS(\varphi, \lambda, t_i)$.

Para calcular o VTEC em um momento arbitrário $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ entre *grids* rotacionados e consecutivos de VTEC, assumindo VTEC estacionário em hora local, podem ser introduzidas longitudes rotacionadas dos mapas utilizados, anterior e posterior, considerando a interpolação no tempo t : $\lambda'_i = \lambda + (t - t_i)$, e $\lambda'_{i+1} = \lambda + (t - t_{i+1})$, expressa em graus e considerando que $1h=15^\circ$. Com isso, o VTEC com longitudes rotacionadas pode ser

calculado com uma interpolação linear obtida da Equação (64), considerando $q=l$ e latitude constante ($p = 0$):

$$VTEC(\varphi_j, \lambda'_k, t_i) = VTEC(\varphi_j, \lambda_k + l\Delta\lambda, t_i) = (1 - l) \cdot VTEC(\varphi_j, \lambda_k, t_i) + l \cdot VTEC(\varphi_j, \lambda_k + \Delta\lambda, t_i), \quad (65)$$

com $0 \leq l \leq 1$. Após o cálculo dos quatro valores rotacionados de $VTEC(\varphi_j, \lambda'_k, t_i)$ nos tempos t_i e t_{i+1} , a Equação (64) pode ser utilizada para a interpolação espacial. Após a interpolação espacial nos tempos t_i e t_{i+1} , a interpolação em tempo pode ser calculada com:

$$VTEC(\varphi, \lambda, t) = \frac{t_{i+1}-t}{t_{i+1}-t_i} VTEC_i(\varphi, \lambda'_k, t_i) + \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i} VTEC_{i+1}(\varphi, \lambda'_k, t_{i+1}). \quad (66)$$

As equações de interpolação (64), (65) e (66) permitem o cálculo do VTEC para um ponto arbitrário no tempo e espaço, entretanto, a acurácia da interpolação dos valores decresce com o aumento dos intervalos de amostragem $\Delta\varphi, \Delta\lambda$ e Δt . Mais estudos sobre o impacto da resolução dos GIMs na interpolação do VTEC podem ser consultados em Liu et. al (2021), Goss et. al (2019) e Goss et. al (2020). A possibilidade que foi investigada neste estudo foi a de se obter melhoria na interpolação dos valores de VTEC ao se introduzir fatores adicionais (f_1 e f_2) como peso para os valores de VTEC na Equação (65) considerando os valores de RMS. Assim, a Equação (65) foi adaptada como:

$$VTEC_{RMS}(\varphi_j, \lambda_k + l\Delta\lambda, t_i) = f_1 \cdot (1 - l) \cdot VTEC(\varphi_j, \lambda_k, t_i) + f_2 \cdot l \cdot VTEC(\varphi_j, \lambda_k + \Delta\lambda, t_i), \quad (67)$$

onde $VTEC_{RMS}$ é o VTEC interpolado com inclusão de um peso baseado nos valores de RMS (f_1 and f_2):

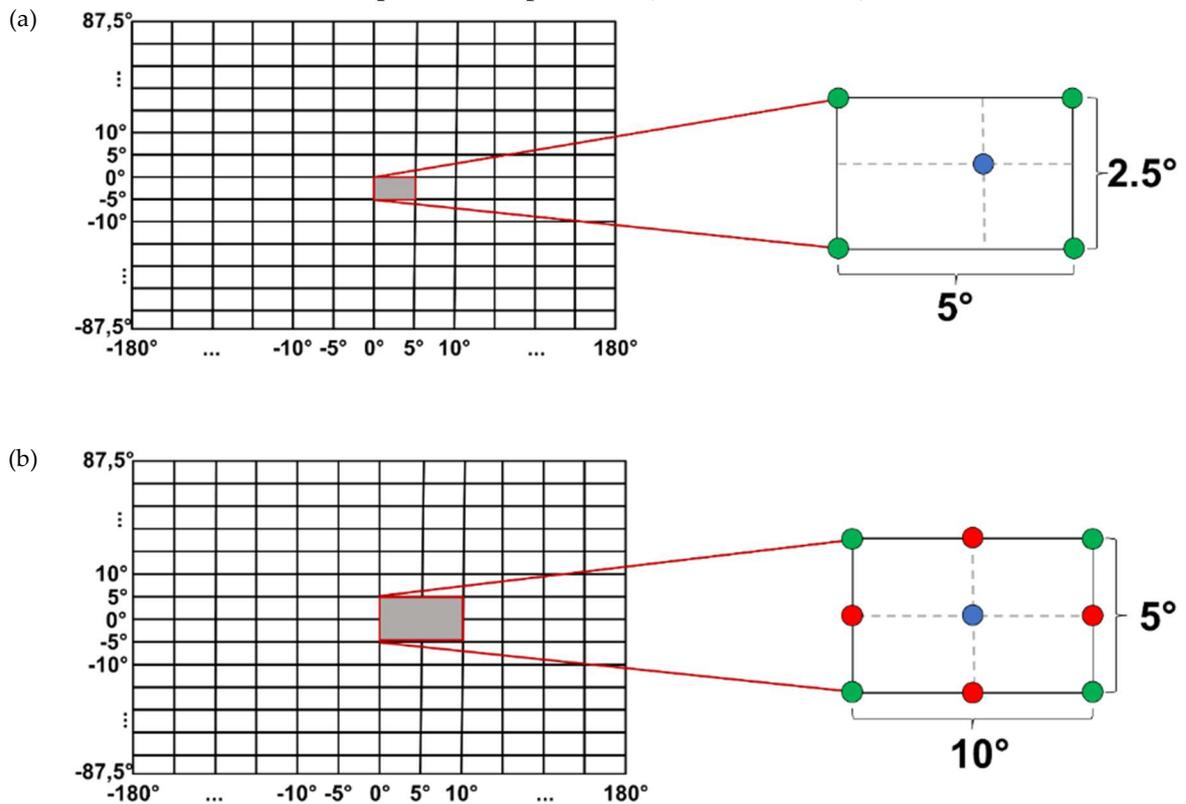
$$f_1 = \frac{RMS(\varphi_j, \lambda_k + \Delta\lambda, t_i)^2}{RMS(\varphi_j, \lambda_k, t_i)^2 + RMS(\varphi_j, \lambda_k + \Delta\lambda, t_i)^2} \text{ e } f_2 = \frac{RMS(\varphi_j, \lambda_k, t_i)^2}{RMS(\varphi_j, \lambda_k, t_i)^2 + RMS(\varphi_j, \lambda_k + \Delta\lambda, t_i)^2} \quad (68)$$

com $RMS(\varphi_j, \lambda_k, t_i)$ e $RMS(\varphi_j, \lambda_k + \Delta\lambda, t_i)$ sendo obtidos dos GIMs utilizados. Com isso, o desvio padrão dos valores de VTEC também são considerados na estratégia de interpolação, assim como o inverso da distância. Obtendo-se uma interpolação híbrida, baseada na distância e na incerteza do valor de VTEC.

A avaliação do impacto do uso do RMS na interpolação do VTEC foi realizada em dois domínios: ionosférico e do posicionamento GNSS. A avaliação no domínio ionosférico foi baseada no cálculo de cada ponto do *grid* utilizado (pontos azuis), a partir dos valores vizinhos. A Figura 24 (a) representa uma interpolação convencional a partir dos quatro

pontos mais próximos do *grid* (pontos verdes), a Figura 24 (b) apresenta a geometria da interpolação utilizada na avaliação dos valores de VTEC. Três abordagens foram consideradas para as interpolações: utilizando os quatro pontos mais próximos, mantendo a mesma geometria de uma interpolação padrão (pontos verdes); utilizando os quatro pontos mais próximos (pontos vermelhos); e utilizando os oito pontos mais próximos (pontos verdes e vermelhos).

Figura 24 – Geometria dos pontos utilizados para a interpolação padrão (a) do VTEC para um dado ponto (azul) e a interpolação usada para a avaliação (b) a partir: dos quatro pontos com mesma geometria de uma interpolação padrão (verde); dos quatro pontos mais próximos (vermelho); e dos oito pontos mais próximos (verde e vermelho).



Os valores interpolados ($VTEC'$), com ou sem o fator baseado nas incertezas, foram então comparados com os valores originais dos GIMs ($VTEC_{GIM}$). Os valores de RMS dessas diferenças (RMS_{ION}) foram utilizados para a avaliação dos métodos de interpolação:

$$RMS_{ION} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (VTEC_{GIM} - VTEC')^2}, \quad (69)$$

onde n é o número de valores calculados. A avaliação foi realizada a nível global e regional. As análises regionais consideraram uma abordagem baseada em seções latitudinais (seis regiões divididas por latitudes), como apresentado na Figura 25; e uma abordagem baseada em regiões

específicas (com janelas de $20^\circ \times 25^\circ$ em latitude e longitude), correspondentes a regiões dos Estados Unidos, Europa, Brasil e Austrália, como apresentado na Figura 26.

Figura 25 – Análise considerando seis regiões divididas por latitudes.

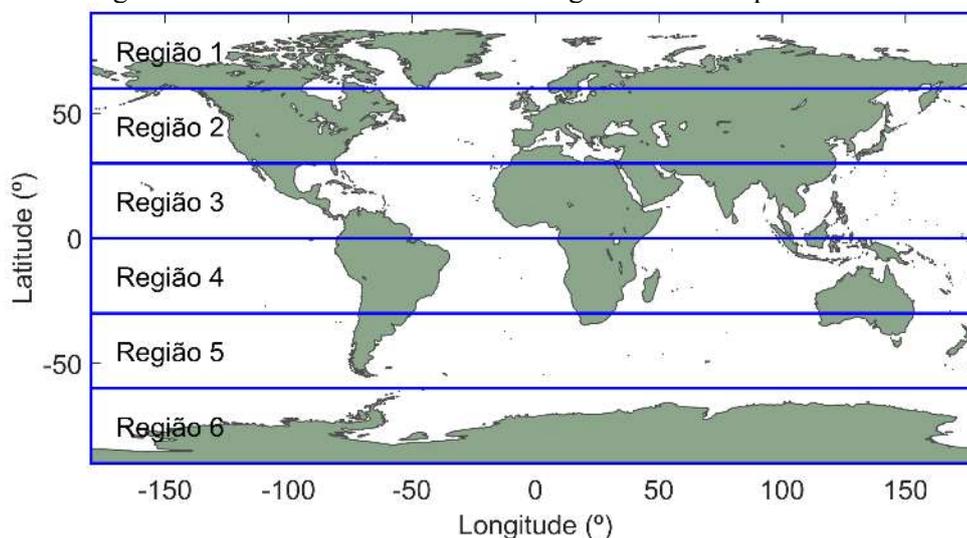
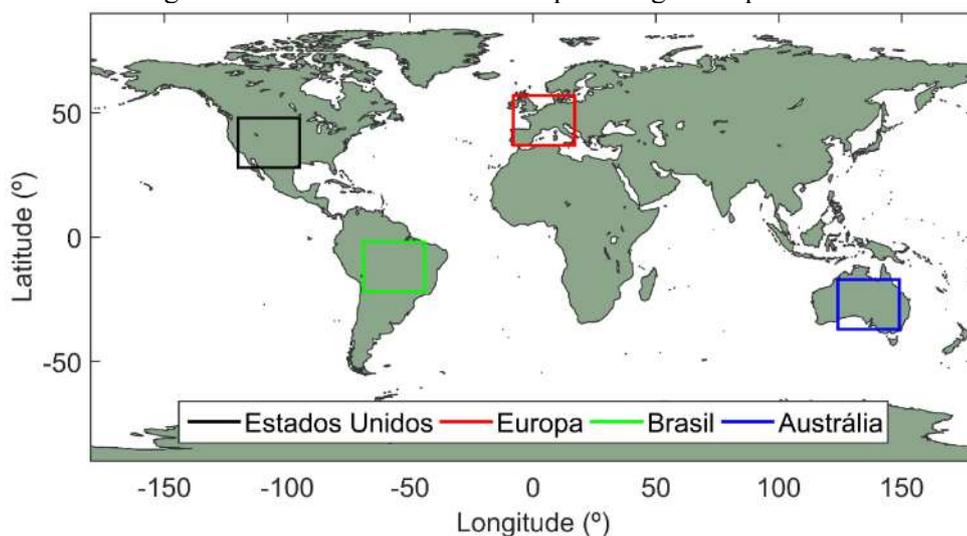


Figura 26 – Análise considerando quatro regiões específicas.



A avaliação do impacto das incertezas do VTEC no domínio do posicionamento foi realizada considerando a região Brasileira. Para isso, foram utilizados dados de estações GNSS para realizar posicionamento com simples frequência com o método PPP em modo cinemático. Como posições de referência, foram utilizados os valores médios dos resultados obtidos com posicionamento para uma semana de dados utilizando PPP (em modo estático com combinação *ion-free* e demais configurações utilizadas nos processamentos em

modo cinemático). Para as análises foram utilizados os valores de RMS do erro obtido no posicionamento (RMS_{POS}), calculado com:

$$RMS_{POS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((X_{Pos} - X_{Sta})^2 + (Y_{Pos} - Y_{Sta})^2 + (Z_{Pos} - Z_{Sta})^2)}, \quad (70)$$

onde X_{Pos} , Y_{Pos} e Z_{Pos} são as posições obtidas com o posicionamento cinemático; e X_{Sta} , Y_{Sta} e Z_{Sta} são as posições médias obtidas com posicionamento estático. As taxas de melhoria (TM) do posicionamento foram calculadas utilizando:

$$ROI = \frac{RMS_{GIM_RMS_off} - RMS_{GIM_RMS_on}}{RMS_{GIM_RMS_off}}, \quad (71)$$

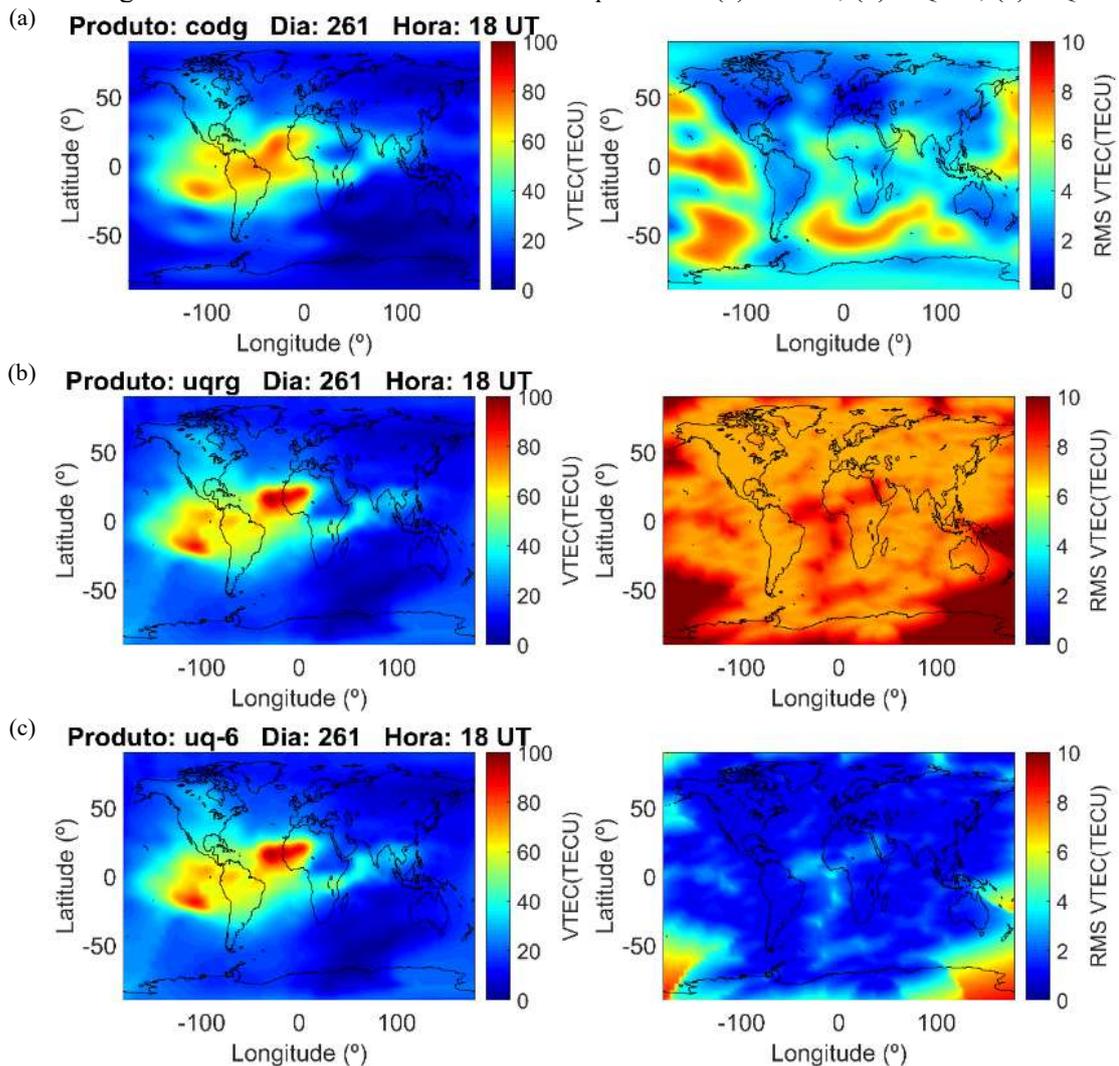
com $RMS_{GIM_RMS_off}$ e $RMS_{GIM_RMS_on}$ sendo os resultados obtidos utilizando GIMs sem e com incertezas, respectivamente.

Dois GIMs do IGS foram avaliados neste estudo, CODG (solução final do CODE) e UQRG (solução rápida com alta amostragem da UPC, com um mapa a cada 15 minutos), ambos disponíveis em CDDIS (2020). Um terceiro produto foi utilizado, denominado UQ-6. Este produto consiste em uma versão do UQRG com a diferença de ter o valor de 6 TECU subtraído dos valores de RMS, recuperando assim os valores originais de RMS estimados, antes da inclusão de valores para nível de proteção (Zhao et al. 2021). A Figura 27 apresenta as plotagens dos valores de VTEC e respectivos mapas de RMS para cada produto utilizado neste estudo, considerando o dia 261 de 2011. Nesta figura é possível observar a semelhança nos valores de VTEC obtidos com diferentes produtos, enquanto os valores de incertezas apresentam uma variação muito maior. Quatro semanas de dados foram utilizadas, considerando cenários com tempestade geomagnética, baixo fluxo solar e elevado fluxo solar (equinócio e solstício). Esses cenários se mostraram representativos para estudos ionosféricos, como demonstrado anteriormente por Hernandez-Pajares et al. (2017). O Quadro 6 apresenta os cenários utilizados com as descrições e dias dos anos correspondentes.

Quadro 6 – Descrição dos cenários utilizados.

Cenário	Descrição	Dias	Ano
1	Tempestade geomagnética	346-352	2006
2	Baixo fluxo solar	234-240	2008
3	Intenso fluxo solar (equinócio)	261-267	2011
4	Intenso fluxo solar (solstício)	352-358	2011

Figura 27 – Valores de VTEC e RMS dos produtos: (a) CODG; (b) UQRG; (c) UQ-6.



Para o posicionamento, foram utilizadas quatro estações GNSS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (Figura 28): MAPA em Macapá-AP (0.05° N, 50.90° O), SAVO em Salvador-BA (11.06° S, 37.57° O), PPTE em Presidente Prudente-SP (21.88° S, 50.59° O) e SMAR em Santa Maria-RS (28.28° S, 52.28° O).

Para os processamentos foi utilizado o software RTKLib (versão 2.4.2) para o posicionamento com PPP utilizando simples frequência em modo cinemático, com dados com taxa de amostragem de 15 segundos. As configurações gerais utilizadas foram: solução combinada *forward/backward*; máscara de elevação de 10° ; correção de marés terrestres; modelo de Saastamoinen para o cálculo do atraso troposférico; efeméride precisas (sp3); dados da constelação GPS apenas; modelo de PVC (*phase center variation*) da antena do satélite; correção de *phase wind up*; exclusão de satélites GPS Block IIA em eclipse; RAIM-FDE (*receiver autonomous integrity monitoring-fault detection and exclusion*); arquivos de DCB; e

sem estratégia de solução das ambiguidades. Conforme mencionado anteriormente, os processamentos das posições de referência seguiram a mesma configuração, exceto pelo uso do modo estático, de dados de dupla frequência e do uso da combinação *ion-free*. Quatro estratégias de cálculo da correção ionosférica foram utilizadas: Klobuchar, IONEX (com e sem incertezas) e *ion-free* (única configuração com dados de dupla frequência). Essas abordagens tiveram finalidade de avaliar o comportamento das soluções com GIM em relação às demais. Como o foco do estudo foi o impacto das incertezas no posicionamento, apenas os resultados obtidos com IONEX são apresentados.

Figura 28 – Estações GNSS utilizadas nas análises no domínio do posicionamento.



4.3.2 Resultados e análises

No domínio ionosférico, os GIMs CODE, UQRG e UQ-6 foram avaliados a nível global e regional. Todas as análises realizadas consideraram as três estratégias apresentadas na Seção 4.3.1 em relação à seleção dos pontos utilizados para a interpolação (Figura 24): quatro pontos mais próximos, mantendo a mesma geometria de uma interpolação padrão; quatro pontos mais próximos; e oito pontos mais próximos. Os resultados com e sem o peso obtido com as incertezas apresentaram valores bastante similares. Da primeira para a última estratégia as diferenças obtidas foram cada vez menos significativas, sendo a abordagem com oito pontos a que obteve menor diferença entre os resultados com e sem o peso baseado nas incertezas. Assim, a seguir são apresentados os resultados com as maiores discrepâncias

obtidas, com quatro pontos mantendo a geometria de uma interpolação padrão, ainda assim, com diferenças muito pequenas.

Na abordagem global, as diferenças médias entre os erros absolutos obtidos com os produtos com e sem o uso das incertezas foram: -0,020 TECU (CODG), +0,002 TECU (UQRG) e -0,007 TECU (UQ-6). A Tabela 6 apresenta os valores médios do erro absoluto obtido com as interpolações com (GIM_{RMSon}) e sem (GIM_{RMSoff}) o peso baseado nas incertezas do VTEC, considerando os quatro cenários e os três GIMs. Em relação aos erros absolutos, os valores médios obtidos por produto foram: 0,29 TECU com CODG, 0,49 TECU com UQRG e 0,53 TECU com UQ-6. Em relação às diferenças, valores positivos indicam menor erro com a utilização da interpolação com peso baseado nas incertezas. Com isso, verifica-se que apesar dos valores serem muito baixos, os resultados com UQRG tiveram tendência de melhoria com a interpolação com peso. Já nos produtos CODG e UQ-6, a interpolação sem peso apresentou menores erros em todos os cenários. De maneira geral, a nível global, o uso do RMS nas interpolações dos valores de VTEC não apresentou diferenças significativas.

Tabela 6 – Média dos erros absolutos obtidos com as interpolações com (GIM_{RMSon}) e sem (GIM_{RMSoff}) o peso baseado nas incertezas e as diferenças entre as duas abordagens para os quatro cenários.

Cenário	CODG (TECU)			UQRG (TECU)			UQ-6 (TECU)		
	GIM_{RMSoff}	GIM_{RMSon}	Diferença	GIM_{RMSoff}	GIM_{RMSon}	Diferença	GIM_{RMSoff}	GIM_{RMSon}	Diferença
1	0,1987	0,2096	-0,0109	0,4183	0,4167	0,0016	0,3997	0,4023	-0,0026
2	0,1202	0,1292	-0,0089	0,2234	0,2230	0,0003	0,2543	0,2559	-0,0015
3	0,4256	0,4582	-0,0326	0,6947	0,6919	0,0028	0,7385	0,7478	-0,0094
4	0,3718	0,3984	-0,0266	0,6440	0,6407	0,0033	0,6781	0,6908	-0,0127

As análises regionais foram divididas em duas: regiões por latitudes; e regiões específicas – Estados Unidos, Europa, Brasil e Austrália. As diferenças de RMS entre a interpolação padrão e a interpolação com peso, considerando os quatro pontos com mesma geometria para as regiões baseadas nas latitudes são apresentadas na Figura 29 com: (a) CODG; (b) UQRG e (c) UQ-6. Novamente valores positivos indicam menor erro utilizando a interpolação com peso. É possível verificar que as duas abordagens apresentaram resultados muito similares, com a maioria das diferenças sendo próximas a zero, sendo os resultados provenientes do produto UQRG os que apresentaram menor dispersão. Porém, pode ser observada uma certa tendência em alguns cenários (principalmente 3 e 4) para melhores resultados com a interpolação com peso para alguns casos específicos, como é o caso da região equatorial (latitudes de -30° a 0°), considerando os produtos UQRG e UQ-6.

As diferenças de RMS entre as duas abordagens de interpolação utilizando os quatro pontos mais próximos com a mesma geometria, neste caso divididos por regiões

específicas, são apresentados na Figura 30 com: (a) CODG; (b) UQRG e (c) UQ-6. Novamente pode ser observada a similaridade entre os resultados obtidos com as duas estratégias de interpolação, principalmente com os dados provenientes do produto UQRG (b). Apesar das diferenças próximas a zero, novamente é possível verificar padrões de melhor desempenho da interpolação com peso baseado nas incertezas para casos específicos, por exemplo, para a região brasileira (verde), principalmente com os produtos UQRG e UQ-6.

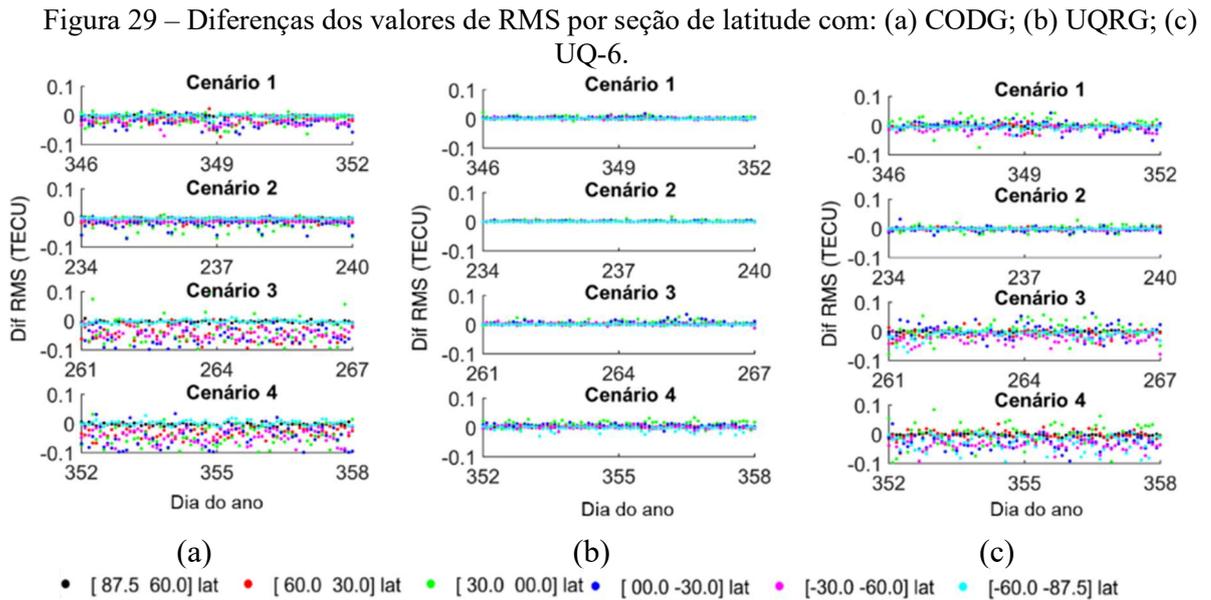
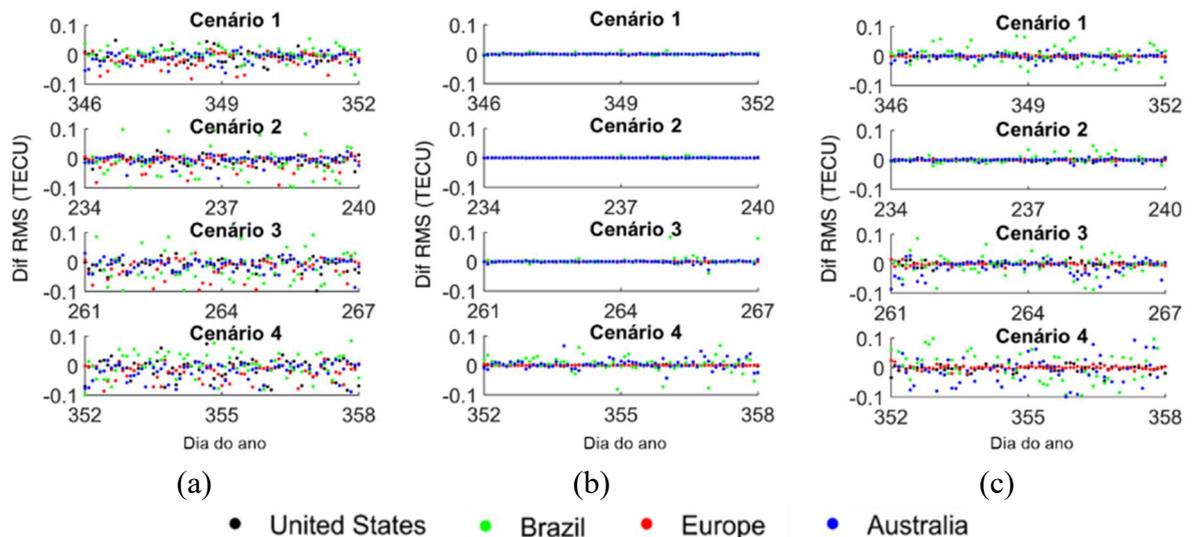


Figura 30 – Diferenças dos valores de RMS por região específica com: (a) CODG; (b) UQRG; (c) UQ-6.



De forma geral, no domínio da ionosfera não foi possível verificar melhorias significativas no método proposto para a interpolação dos valores de VTEC com base nas incertezas fornecidas pelos GIMs. O cenário 2 (baixo fluxo solar) apresentou as menores diferenças entre as abordagens. Os cenários 3 e 4 (intenso fluxo solar) apresentaram as maiores

diferenças entre os casos testados, ainda que com valores muito baixos. Vale ressaltar que, para este estudo, não foram utilizados dados externos para a avaliação, apenas os valores de VTEC originais dos próprios GIMs foram adotados como referência. No entanto, apesar de não levar a melhorias significativas (diferenças inferiores a 0,1 TECU), alguns padrões de melhoria puderam ser verificados, indicando certa influência regional, considerando a região equatorial e a região Brasileira em específico, principalmente com os resultados provenientes dos produtos UQRG e UQ-6. Esta foi uma das motivações para a análise da influência do uso das incertezas no domínio do posicionamento para uma região equatorial utilizando os três produtos: CODG, UQRG e UQ-6.

Os resultados do posicionamento utilizando o produto CODG com (vermelho) e sem (azul) o peso baseado nas incertezas são apresentados na Figura 31, a partir do erro 3D médio por época em relação à hora para cada um dos cenários, considerando as estações: (a) MAPA; (b) SAVO; (c) PPTE; e (d) SMAR. Pode ser verificado que, em geral, os menores erros são observados no cenário 2 (baixo fluxo solar), enquanto os maiores erros correspondem aos cenários 3 e 4 (intenso fluxo solar). Em relação às estações utilizadas, SMAR (localizada em região com menor impacto da atividade ionosférica) apresentou os menores e mais regulares erros. A influência positiva no uso das incertezas do VTEC para o posicionamento GNSS é evidente para a maior parte dos casos, principalmente para os cenários 3 e 4. Nesses cenários, é possível verificar um aumento nos erros depois das 20h UT até 04h UT, especialmente para as estações SAVO e PPTE.

A Figura 32 apresenta os valores de VTEC calculados para as posições das estações utilizadas, considerando o primeiro dia de cada cenário utilizando dados do produto CODG com (linhas pontilhadas) e sem (linhas contínuas) incertezas. Valores maiores de VTEC podem ser observados para os cenários 3 e 4. Em relação às estações, SMAR apresentou os menores valores de VTEC na maior parte do tempo. Os valores de VTEC estimados indicam a influência do conteúdo de elétrons na qualidade do posicionamento. Quanto ao cálculo do valor do VTEC com ou sem considerar as incertezas, mais uma vez fica clara a baixa relevância que esses valores apresentaram no cálculo direto do valor do VTEC.

Figura 31 – Erro médio 3D do posicionamento utilizando CODG para as estações: (a) MAPA; (b) SAVO; (c) PPTE; e (d) SMAR.

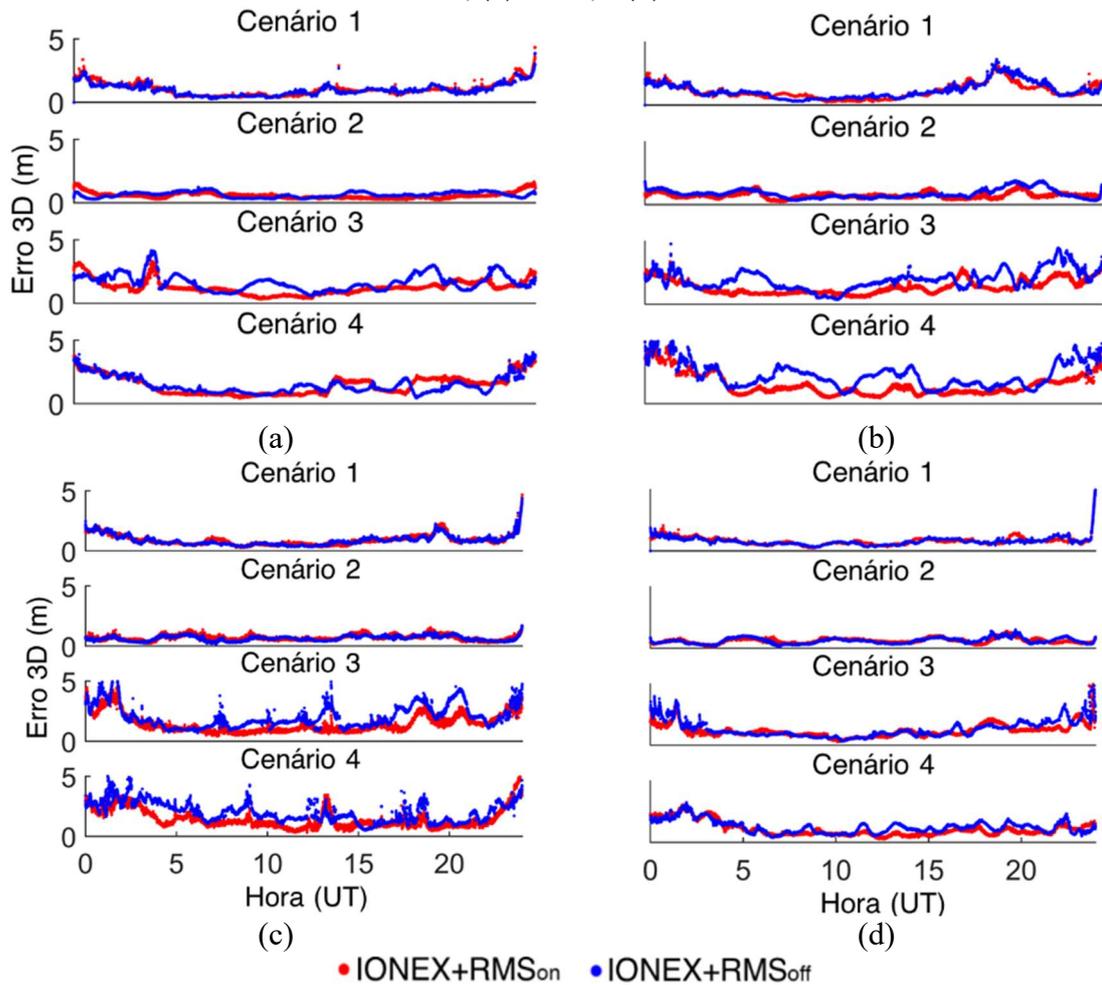
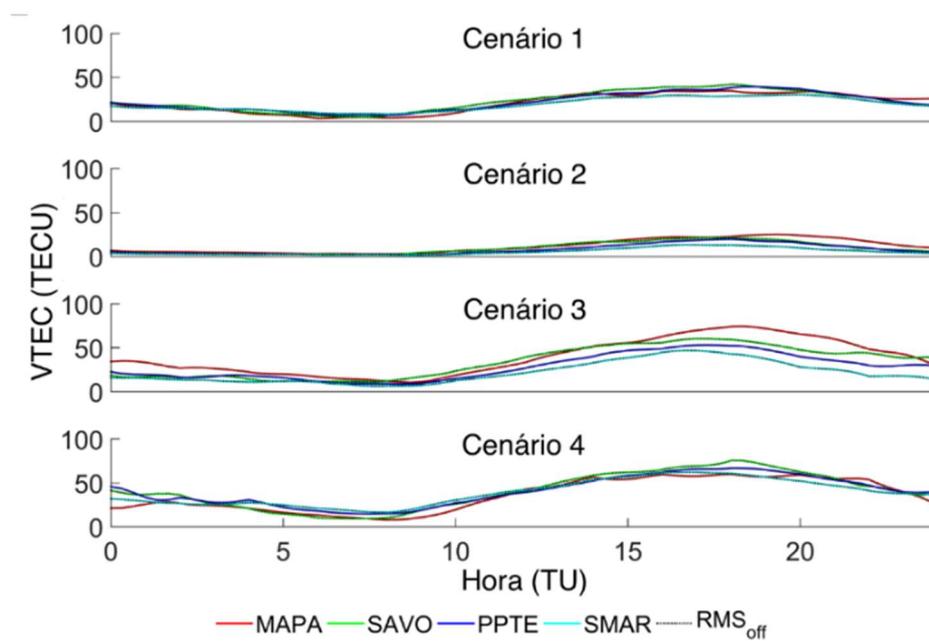
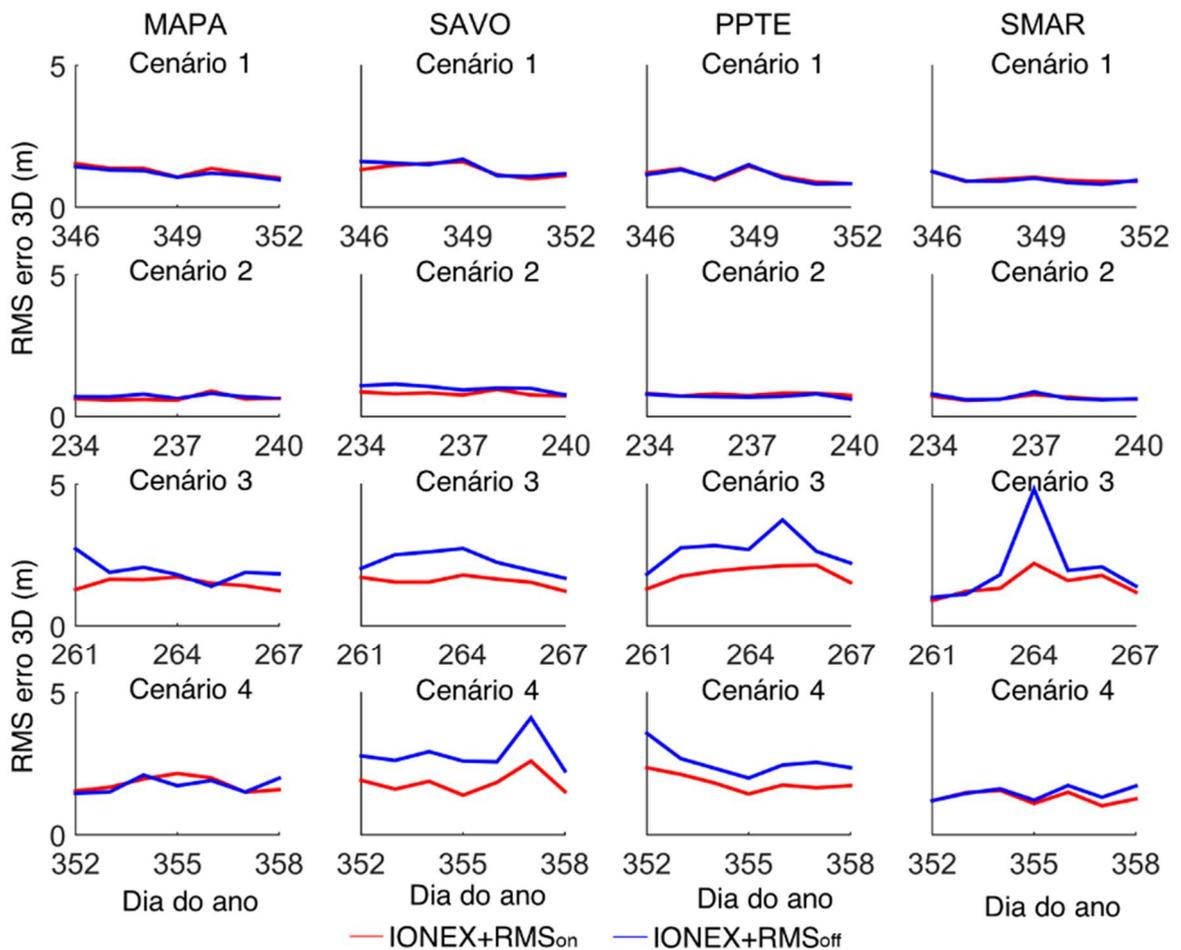


Figura 32 – VTEC calculado com CODG para o primeiro dia de cada cenário para as posições das estações MAPA, SAVO, PPTE e SMAR.



A Figura 33 apresenta os valores de RMS do erro 3D no posicionamento para cada dia dos cenários considerados, utilizando CODG com (vermelho) e sem (azul) as incertezas do VTEC, para as estações: (a) MAPA, (b) SAVO, (c) PPTE e (d) SMAR. Os resultados confirmam o comportamento observado anteriormente com os valores médios por época (Figura 31), com melhoria no erro obtido no posicionamento com o uso dos valores de incerteza do VTEC, principalmente nos cenários 3 e 4, em específico para as estações SAVO e PPTE.

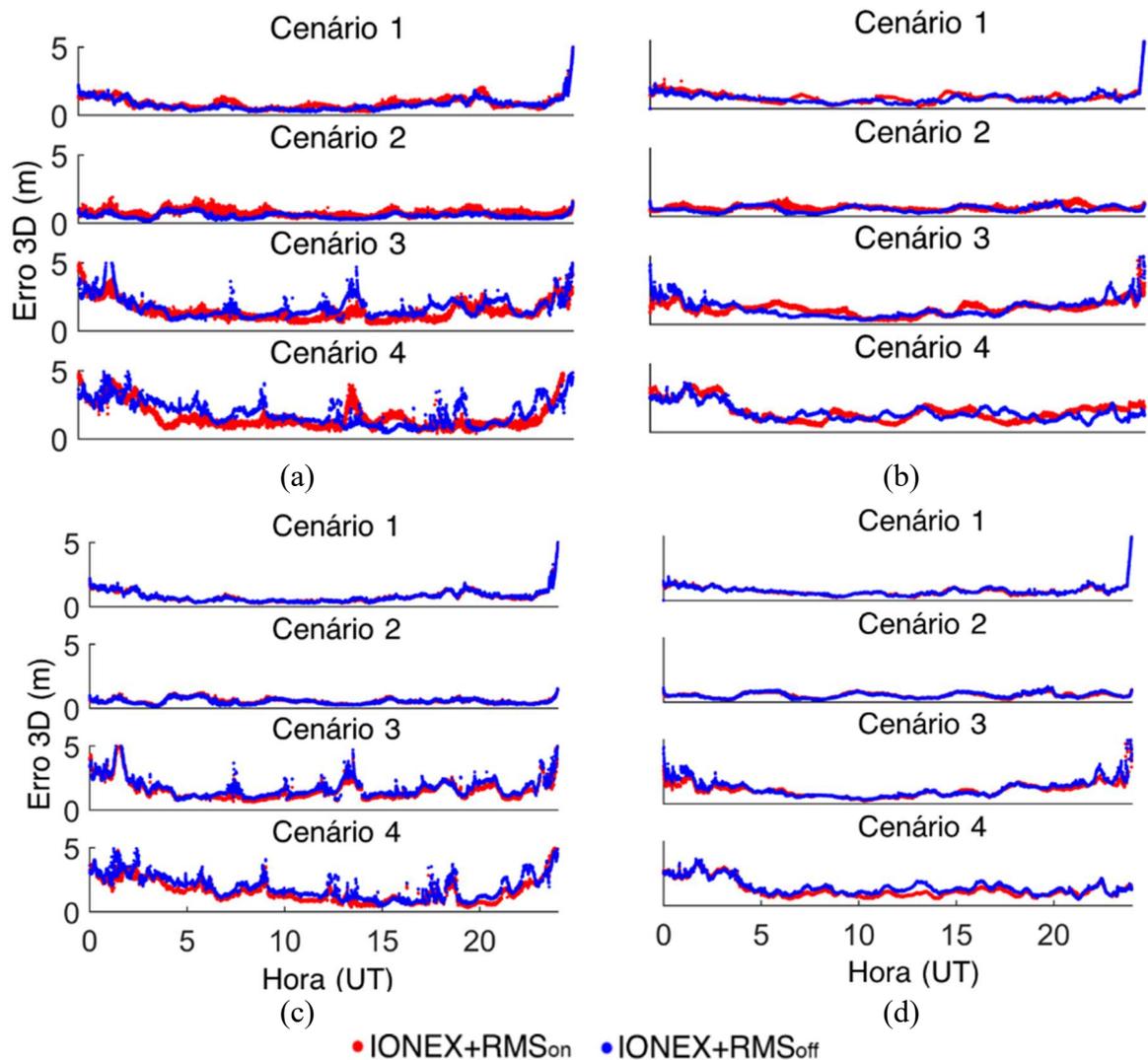
Figura 33 – RMS do erro 3D usando CODG para as estações: (a) MAPA; (b) SAVO; (c) PPTE; e (d) SMAR.



Os resultados obtidos com UQRG e UQ-6 apresentaram comportamento parecido ao obtido com CODG: similaridade no comportamento dos erros em relação à hora do dia (com valores maiores entre 20h e 04h UT); cenários com maior influência do uso das incertezas para o posicionamento (intenso fluxo solar); e em relação às estações com melhorias mais significativas (SAVO and PPTE). A Figura 34 apresenta os resultados dos dois produtos para as estações com menor (SMAR) e maior (PPTE) impacto observado. Em relação às

diferenças entre UQRG e UQ-6, é possível verificar que UQ-6 apresenta comportamento mais satisfatório: melhora com a abordagem considerando as incertezas do VTEC para os cenários de intenso fluxo solar (3 e 4), além de não apresentar piora nos resultados do período de baixo fluxo solar (cenário 2), semelhante ao que ocorre no cenário de atividade geomagnética (cenário 1).

Figura 34 – Erro médio 3D do posicionamento utilizando: (a) UQRG para estação PPTE; (b) UQRG para estação SMAR; (c) UQ-6 para estação PPTE; e (d) UQ-6 para estação SMAR



De modo geral, o erro 3D obtido no posicionamento com CODG (1,22 m) foi um pouco maior considerando os resultados sem o uso das incertezas do VTEC, enquanto UQRG e UQ-6 obtiveram erro médio de 1,17 m. Em relação aos resultados com o uso das incertezas, CODG apresentou desempenho um pouco melhor que os outros dois produtos, com erro médio de 0,87 m, enquanto UQRG obteve 0,94 m e UQ-6 0,97 m.

A Tabela 7 apresenta as taxas de melhoria com a inclusão das incertezas provenientes dos GIMs para o posicionamento em relação ao uso dos GIMs sem incertezas. Novamente as maiores taxas de melhoria são destacadas em azul, enquanto as piores são destacadas em vermelho. As menores taxas de melhorias ocorreram no primeiro cenário (tempestade geomagnética), exceto pela estação PPTE, que apresentou uma piora de 12% no segundo cenário (baixo fluxo solar). SAVO e PPTE apresentaram altas taxas de melhoria nos cenários 3 e 4 (intenso fluxo solar), enquanto MAPA e SMAR tiveram as maiores taxas nos cenários 2 e 3 (baixo e intenso fluxo solar).

Tabela 6 – Média das taxas de melhoria com a utilização do RMS do VTEC por estação e cenário.

Estação	Cenário	CODG	UQRG	UQ-6
MAPA	1	-1%	-6%	5%
	2	32%	27%	20%
	3	34%	27%	17%
	4	8%	3%	17%
SAVO	1	9%	7%	10%
	2	41%	25%	15%
	3	38%	32%	26%
	4	47%	40%	27%
PPTE	1	4%	-4%	5%
	2	0%	-38%	3%
	3	34%	28%	14%
	4	37%	26%	21%
SMAR	1	6%	0%	10%
	2	23%	20%	14%
	3	22%	24%	18%
	4	27%	6%	16%

As taxas médias de melhoria são apresentadas na Tabela 8. CODG apresentou as maiores taxas de melhoria para as quatro estações consideradas. UQ-6 foi o único produto que não apresentou piora média em nenhum cenário considerado (Tabela 7), além de apresentar maiores taxas de melhoria que UQRG para três estações, a exceção foi a estação SAVO. Os valores médios das taxas de melhoria para CODG, UQRG e UQ-6 foram 23%, 14% e 15 %, respectivamente.

Neste estudo foram apresentadas duas formas de avaliação da influência do uso das incertezas do VTEC disponíveis nos GIMs: no domínio da ionosfera e no posicionamento GNSS. A análise no domínio da ionosfera considerou uma abordagem global e duas regionais. Já a análise do posicionamento GNSS foi realizada considerando quatro estações da região brasileira. Todas as análises consideraram quatro cenários: tempestade

geomagnética, baixo fluxo solar e intenso fluxo solar (solstício e equinócio). Os três produtos avaliados foram CODG, UQRG e UQ-6.

Tabela 7 – Média das taxas de melhoria com o uso do RMS do VTEC por estação.

Estação	CODG	UQRG	UQ-6
MAPA	18%	13%	15%
SAVO	34%	26%	20%
PPTE	19%	3%	11%
SMAR	19%	13%	14%

4.3.3 *Considerações sobre o uso de incertezas do VTEC*

Nesta seção foi realizada uma dupla avaliação do impacto das incertezas dos mapas ionosféricos no cálculo da correção ionosférica. Foi avaliado um método de interpolação do VTEC baseado no inverso da distância com ponderação baseada nos valores de RMS fornecidos nos GIMs. As análises consideraram abordagens globais e regionais de avaliação. Além disso, foi realizada uma análise do impacto das incertezas do VTEC diretamente no posicionamento GNSS. Para esta etapa, foram consideradas regiões brasileiras com diferentes características ionosféricas.

Os resultados no domínio da ionosfera não levaram a melhorias significativas em nenhuma das abordagens aplicadas, sendo que a interpolação tradicional e a considerando o uso dos valores de RMS do VTEC apresentaram discrepâncias próximas de zero. Entretanto, alguns padrões de comportamento dos erros obtidos puderam ser observados, especificamente para alguns cenários considerando a região brasileira com os produtos UQRG e UQ-6.

Os resultados no domínio do posicionamento mostraram significativa melhoria com o uso das incertezas do VTEC no posicionamento GNSS. As taxas de melhorias mais significativas foram observadas nos cenários com intenso fluxo solar, principalmente para as estações SAVO e PPTE. A ordem de magnitude dos erros obtidos no posicionamento está de acordo com outras abordagens similares como as apresentadas por Orús-Perez (2016) e Prol et al. (2018b). Entre os produtos utilizados no posicionamento, UQRG apresentou valor médio dos erros 5 cm menor que CODG, considerando a abordagem sem as incertezas do VTEC. Com o uso das incertezas, CODG apresentou valor médio 7 cm menor que UQRG e 10 cm menor que UQ-6. UQ-6 foi o único produto a não apresentar taxas de melhoria negativas (piora) em nenhum cenário. As médias gerais de melhoria com cada produto foram de 23%, 14% e 15%, para CODG, UQRG e UQ-6, respectivamente.

4.4 MAPAS GLOBAIS VS MAPAS REGIONAIS

Conforme mencionado anteriormente, os valores de VTEC vem sendo disponibilizados há mais de duas décadas por diversos centros de pesquisa por meio dos GIMs em formato IONEX. Os GIMs disponíveis atualmente apresentam diferenças nas estratégias de processamento, porém, em geral, são fornecidos com mesma resolução espacial. A resolução temporal, comumente de duas horas, pode ser diferente em alguns produtos como CODG (01 hora a partir do dia 292 de 2014), UQRG (15 minutos) ou OTHG (10 minutos). Em relação aos mapas regionais, tanto a resolução temporal quanto a espacial são bastante variáveis. Além disso, existem diferenças na área de abrangência e, conseqüentemente nas estações cujos dados são utilizados para a estimativa dos valores de VTEC.

No presente estudo, objetivou-se confrontar o desempenho dos GIMs em comparação com os RIMs para o território brasileiro. Para isso, as estratégias desenvolvidas nas seções 4.2 e 4.3 foram aplicadas para a realização de uma avaliação com base em dados de ionossondas e no posicionamento GNSS.

4.4.1 *Metodologia*

Neste estudo, o objetivo foi aplicar as metodologias desenvolvidas nas Seções 4.2 e 4.3 para avaliar e comparar o desempenho de mapas ionosféricos globais e regionais, considerando a validação por meio de dados de ionossondas e do posicionamento GNSS. Para a análise com dados de ionossondas, foram utilizados os dados das mesmas ionossondas do INPE apresentadas na Seção 4.2 (Figura 12): BVJ03, SAA0K, FZA0M e CAJ2M.

A avaliação foi realizada a partir da interpolação dos valores de f_oF_2 de uma ionossonda de cada um dos seis pares formados (Quadro 5), utilizando a variabilidade do VTEC entre as duas regiões, conforme apresentado na Equação (61). Por fim, os valores obtidos foram comparados com os valores medidos pela segunda ionossonda do par. As análises deste estudo também foram realizadas com base nos valores de RMS (Equação 56) das diferenças obtidas.

Para o posicionamento, foram utilizadas as mesmas estações GNSS da RBMC da Figura 28, com exceção da estação MAPA, que foi desativa, sendo substituída pela estação APMA, no mesmo município. As estratégias de processamento e análises foram realizadas de maneira análoga ao estudo desenvolvido na Seção 4.3. A única adaptação necessária foi a exportação dos mapas regionais em *grids* globais com valores nulos das regiões

sem cobertura pelo RIMs. Isso foi necessário, uma vez que a versão utilizada do software RTKLib não reconhece formatos de mapas ionosféricos para regiões específicas.

Para o presente estudo, diferente dos cenários utilizados anteriormente, foi utilizado um cenário mais recente de tempestade geomagnética, semana correspondente aos dias 246 a 252 de 2017. A utilização dos dados desta semana foi baseada na disponibilidade dos mapas ionosféricos regionais. Os produtos globais avaliados foram: UQRG, CODG, OTHG e OTLG. Os produtos regionais avaliados foram: INPE, OTHR e OVHR. Além desses dois grupos de produtos, foi testado um tipo de mapa híbrido, chamado de OTRG, composto pelas informações regionais do mapa OTHR e completado com informações globais do modelo utilizado para o produto OTHG, reestimadas para a mesma resolução espacial do mapa regional, como mencionado anteriormente na Seção 4.1.3. Esta abordagem foi particularmente importante nas análises relacionadas ao posicionamento, conforme será apresentado a seguir na Seção 4.4.2. O Quadro 7 apresenta as descrições dos produtos utilizados.

Quadro 7 – GIMs utilizados na avaliação.

Tipo	Produto	Descrição
Global	UQRG	Solução rápida com alta taxa, um mapa a cada 15 minutos (UPC)
	CODG	Solução final (CODE)
	OTHG	Solução final (DGFI-TUM)
	OTLG	Solução final (DGFI-TUM)
Regional	INPE	Solução final (INPE)
	OTHR	Solução final (DGFI-TUM)
	OVHR	Solução final (DGFI-TUM)
Híbrido	OTRG	Solução derivada dos produtos OTHG e OTHR (DGFI-TUM)

4.4.2 *Resultados e análises*

A Figura 35 apresenta os valores de RMS das diferenças entre os valores medidos de f_oF_2 pelas ionossondas e os valores estimados com auxílio dos mapas ionosféricos (globais, regionais e híbrido), bem como a simples diferença entre os valores medidos pelos pares de ionossondas: (a) FZA0M-SAA0K; (b) SAA0K-BVJ03; (c) CAJ2M-FZA0M; (d) CAJ2M-SAA0K; (e) FZA0M-BVJ03; e (f) CAJ2M-BVJ03. Vale ressaltar que para a semana utilizada, houve ausência de dados da estação BVJ03 que comprometeu as análises da maior parte dos dias utilizados para os pares que contém esta ionossonda. De maneira geral, é possível verificar que os mapas apresentaram desempenho melhor que a opção sem interpolação (*off*). Os mapas regionais do DGFI-TUM (OTHR e OVHR) apresentaram os menores erros e

comportamento mais regular entre os produtos analisados. Os mapas globais apresentaram comportamento semelhante, com melhor desempenho geral do CODG, seguido por UQRG.

O produto que apresentou pior desempenho foi o mapa regional do INPE. Em relação às distâncias das ionossondas, considerando o par com menor distância (Figura 35-a) é possível verificar erros mais próximos entre o método com interpolação e a comparação direta dos valores medidos pelas ionossondas. A análise efetiva da influência do aumento da distância entre os pares ficou prejudicada pela ausência de dados da estação BVJ03, porém, ainda assim, é possível verificar a melhoria do desempenho do uso da interpolação com mapas ionosféricos em relação à simples comparação dos dados medidos pelas ionossondas. O desempenho observado neste experimento é compatível com o observado na Seção 4.2.

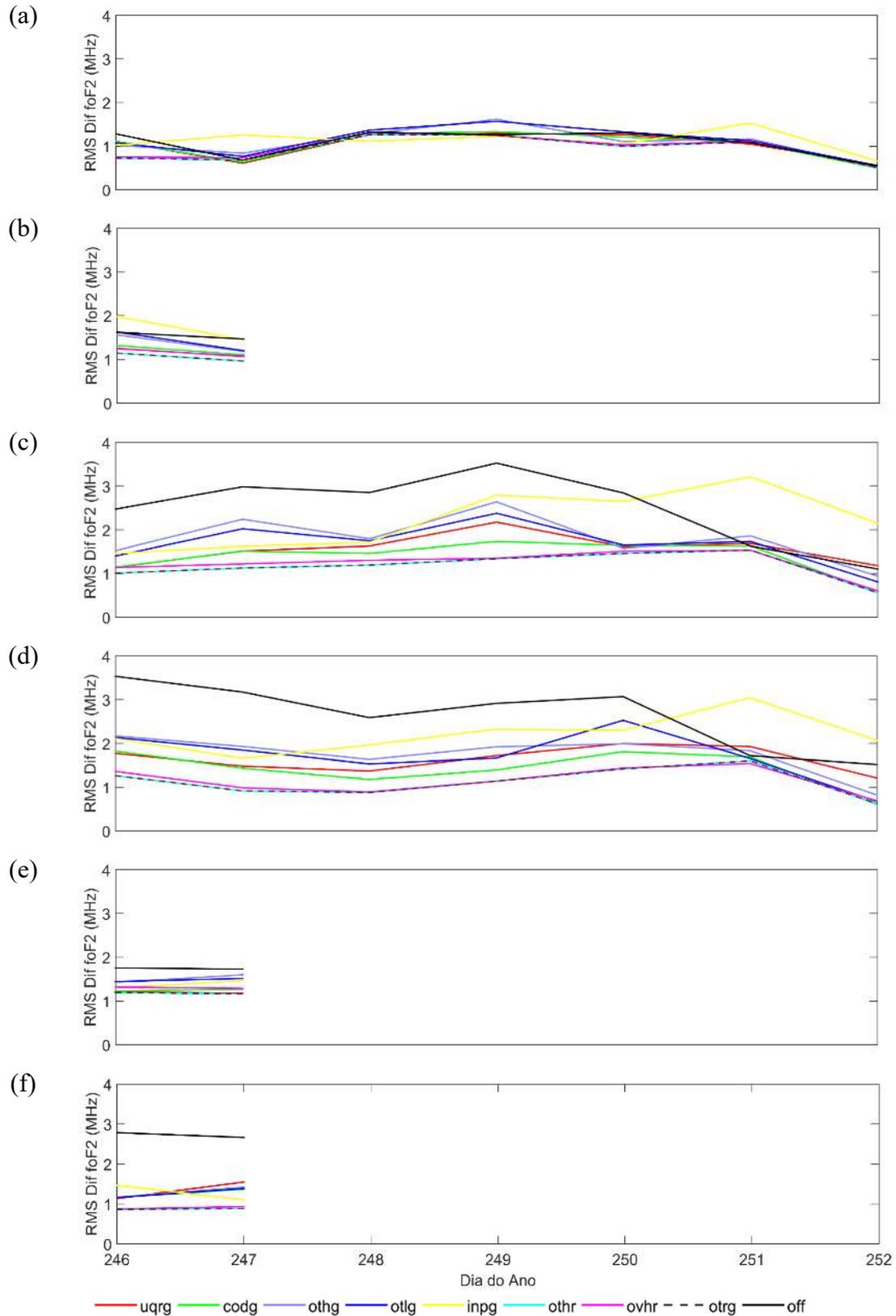
A Tabela 9 apresenta as médias dos valores de RMS das diferenças de foF₂ para cada par de ionossondas, os menores erros são destacados em azul e os maiores em vermelho. A partir desses resultados é possível verificar que, além de apresentar os valores mais discrepantes, os erros médios obtidos com o modelo do INPE para os dois pares com ionossondas mais próximas foram maiores que a comparação direta entre os valores das ionossondas. Os produtos que obtiveram o melhor desempenho para todos os pares foram OTHR e, conseqüentemente, OTRG, uma vez que os valores de VTEC da região brasileira deste produto são obtidos a partir do produto OTHR.

Tabela 9 – Médias dos RMS das diferenças de valores de foF₂ medidos por ionossondas e estimados com auxílio de mapas ionosféricos e a simples diferença dos entre os valores das duas ionossondas (*off*).

Pares de Ionossondas	Distâncias (km)	UQRG (MHz)	CODG (MHz)	OTHG (MHz)	OTLG (MHz)	INPE (MHz)	OTHR (MHz)	OVHR (MHz)	OTRG (MHz)	<i>off</i> (MHz)
FZA0M_SAA0K	660	1,0234	1,0233	1,0796	1,1151	1,1239	0,9360	0,9589	0,9360	1,0711
SAA0K_BVJ03*	1916	1,1608	1,2120	1,3725	1,4140	1,7144	1,0544	1,1615	1,0544	1,5451
CAJ2M_FZA0M	2215	1,5646	1,3859	1,7976	1,6787	2,2296	1,1778	1,2395	1,1778	2,4886
CAJ2M_SAA0K	2247	1,6405	1,4206	1,7576	1,7195	2,2112	1,1224	1,1513	1,1224	2,6459
FZA0M_BVJ03*	2574	1,1952	1,2516	1,5153	1,4814	1,3849	1,1788	1,3058	1,1788	1,7397
CAJ2M_BVJ03*	3308	1,3412	1,2663	1,2944	1,2738	1,2852	0,8782	0,9066	0,8782	2,7225

*Valores médios calculados apenas com dois dias de dados e não com uma semana, como os demais pares, devido à ausência de dados da estação BVJ03.

Figura 35 – RMS das diferenças de valores de foF₂ medidos por ionossondas e estimados com auxílio de mapas ionosféricos e a simples diferença entre os valores das duas ionossondas (*off*) para dados de 2017: (a) FZA0M-SAA0K; (b) SAA0K-BVJ03; (c) CAJ2M-FZA0M; (d) CAJ2M-SAA0K; (e) FZA0M-BVJ03; e (f) CAJ2M-BVJ03.



A Tabela 10 apresenta as taxas de melhoria dos valores obtidos com os mapas em relação à comparação direta dos valores medidos com as ionossondas, as menores taxas são destacadas em vermelho e as maiores são destacadas em azul. Os produtos com as melhores taxas de melhoria foram os mesmos que tiveram os menores erros, alcançando valores de até 67%. De modo geral, INPE apresentou as menores taxas de melhoria em quatro dos seis pares, e foi o único produto a apresentar taxas negativas para dois deles (um deles contendo a estação BVJ03, com ausência de dados em alguns dias). Outros dois produtos apresentaram taxas negativas para o par de ionossondas mais próximas (OTHG e OTLG). Para os dois pares mais distantes OTHG e UQRG apresentaram as melhores taxas (ambos os pares contendo a estação BVJ03, com ausência de dados em alguns dias).

Tabela 10 – Taxas de melhoria dos RMS das diferenças de valores de foF₂ medidos por ionossondas e estimados com auxílio de mapas ionosféricos em relação à simples diferença dos entre os valores das duas ionossondas.

Pares de Ionossondas	Distâncias (km)	UQRG (%)	CODG (%)	OTHG (%)	OTLG (%)	INPE (%)	OTHR (%)	OVHR (%)	OTRG (%)
FZA0M_SAA0K	660	4,45	4,46	-0,79	-4,11	-4,93	12,61	10,48	12,61
SAA0K_BVJ03*	1916	24,87	21,56	11,17	8,48	-10,96	31,76	24,83	31,76
CAJ2M_FZA0M	2215	37,13	44,31	27,77	32,54	10,41	52,67	50,19	52,67
CAJ2M_SAA0K	2247	38,00	46,31	33,57	35,01	16,43	57,58	56,49	57,58
FZA0M_BVJ03*	2574	31,30	28,06	12,90	14,85	20,39	32,24	24,94	32,24
CAJ2M_BVJ03*	3308	50,74	53,49	52,46	53,21	52,79	67,74	66,70	67,74

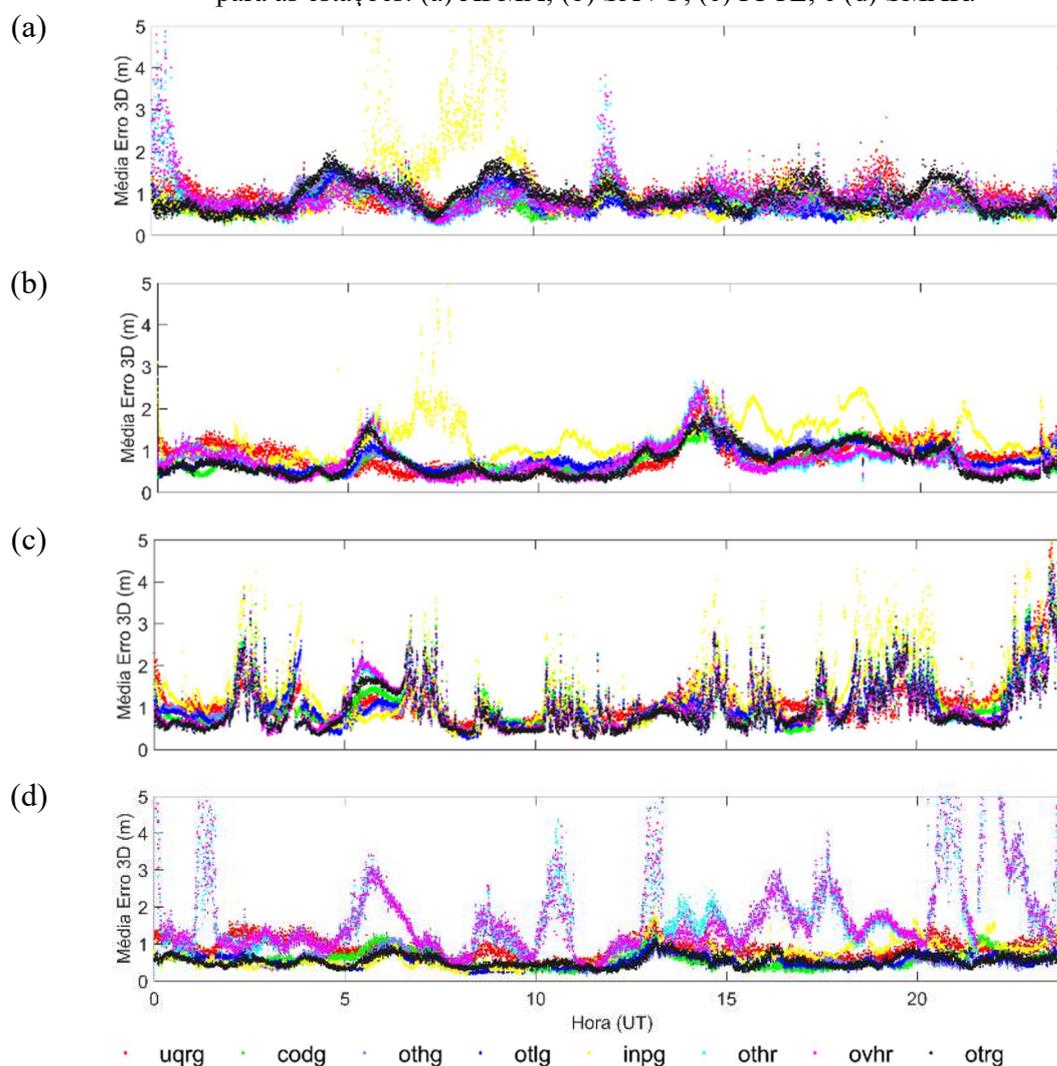
*Valores médios calculados apenas com dois dias de dados e não com uma semana, como os demais pares, devido à ausência de dados da estação BVJ03.

A Figura 36 apresenta os valores de erro médio 3D obtidos no posicionamento GNSS com os oito tipos de mapas ionosféricos selecionados para as estações: (a) APMA; (b) SAVO; (c) PPTE; e (d) SMAR. Nesse experimento a mesma estratégia de configuração do RTKLib adotada na Seção 4.3 foi utilizada. De modo geral, é possível verificar que os resultados provenientes da estação PPTE (Figura 35-c) apresentaram os dados mais ruidosos ao longo do dia. Em todas as estações verifica-se o valor elevado dos erros obtidos com o produto INPE. Vale ressaltar o elevado erro obtido com os produtos regionais do DGFI-TUM (OTHR e OVHR). Com exceção da estação PPTE, destacam-se os valores elevados obtidos com esses produtos. No entanto, o produto corresponde apenas à região brasileira, portanto, com exceção da estação PPTE, as demais estações são localizadas em regiões mais próximas às bordas dos mapas regionais. Esse comportamento indicou a necessidade da utilização de valores globais para completar o *grid* utilizado, assim foi gerado o produto híbrido chamado OTRG, que na maior parte dos casos apresentou o melhor desempenho.

A Tabela 11 apresenta os valores médios do erro 3D obtido no posicionamento por estação e produto utilizado. Os menores erros são destacados em azul,

enquanto os maiores são destacados em vermelho. Diferentemente do bom desempenho observado com os dados de ionossonda pelos produtos OTHR e OVHR, é possível verificar que no posicionamento o mesmo não ocorre, sendo que para a estação SMAR, mais ao sul do país, o produto OVHR apresentou o pior desempenho. Ainda assim, o produto INPE apresenta o pior desempenho nas outras três estações consideradas. Já o produto OTRG obteve o melhor desempenho em três das estações utilizadas, apenas para a estação APMA o produto OTLG teve o menor erro médio.

Figura 36 – Erro médio 3D do posicionamento utilizando mapas ionosféricos utilizando dados de 2017 para as estações: (a) APMA; (b) SAVO; (c) PPTE; e (d) SMAR.



Devido às particularidades do uso de diferentes tipos de produtos, foi realizada uma outra forma de plotagem dos resultados sem trabalhar com valores médios para evitar que determinados comportamentos fossem atenuados. Assim, a Figura 37 ((a) APMA e (b) SAVO) e a Figura 38 ((a) PPTE e (b) SMAR) apresentam os erros obtidos no posicionamento época a época para cada dia da semana analisada. Com esses resultados é

possível visualizar padrões de comportamento que mostram consistência principalmente entre os produtos globais (CODG, OTHG e OTLG), com aumento dos erros em períodos semelhantes. Verifica-se ainda que o produto INPE apresentou resultados mais ruidosos que os demais para a maior parte dos casos. É possível observar também casos como o dia 248 da estação SAVO, que pode ter tido algum problema com os dados coletados entre 15h e 20h UT, uma vez que todos os produtos apresentaram erros maiores no período correspondente. Fica clara também a concordância entre os produtos regionais (OTHR e OVHR) e híbrido (OTRG) do DGFI, com exceção da estação SMAR, localizada no sul do país. Conforme mencionado anteriormente, os produtos regionais apresentaram os resultados mais discrepantes para esta estação. Vale ressaltar que, entre os produtos utilizados, o INPE é o único que não disponibiliza valores de RMS, apesar de não ser o único fator de influência, conforme observado na Seção 4.3, esta pode ser uma das causas da degradação dos resultados obtidos no posicionamento.

Tabela 11 – Valores médios do erro 3D no posicionamento por estação e produto utilizado.

Estações	UQRG (m)	CODG (m)	OTHG (m)	OTLG (m)	INPE (m)	OTHR (m)	OVHR (m)	OTRG (m)
APMA	0.9343	0.7589	0.8083	0.7571	1.1081	0.8675	0.9229	0.9179
SAVO	0.8502	0.7451	0.8507	0.8266	1.3055	0.7659	0.7712	0.7360
PPTE	1.1331	1.1214	1.0524	1.1031	1.4143	1.0014	1.0108	0.9805
SMAR	0.8445	0.5711	0.5446	0.5365	0.6904	1.8048	1.8233	0.5407

Figura 37 – Erro 3D obtido no posicionamento utilizando mapas ionosféricos para as estações: (a) APMA; e (b) SAVO.

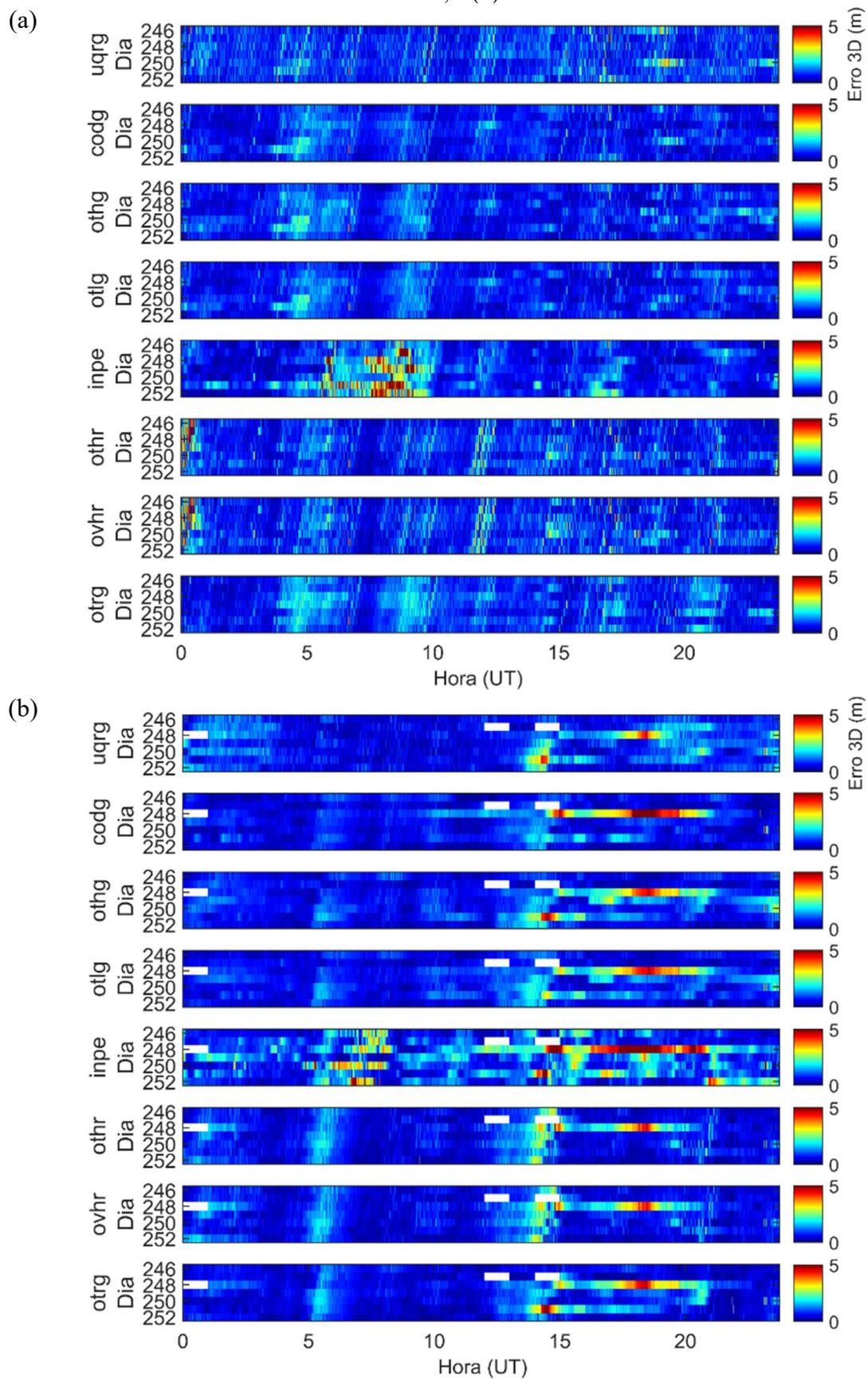
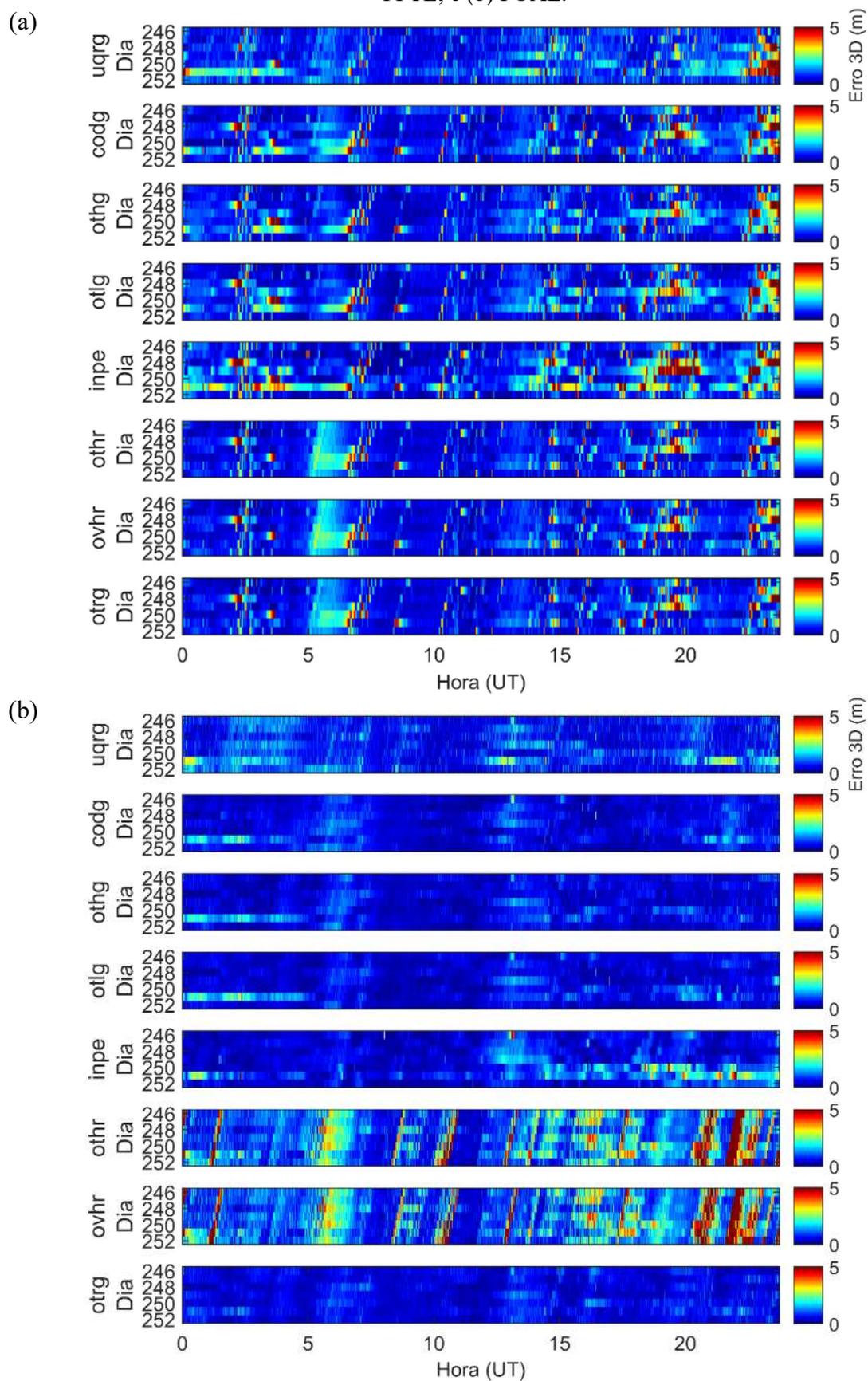


Figura 38 – Erro 3D obtido no posicionamento utilizando mapas ionosféricos para as estações: (a) PPTE; e (b) POAL.



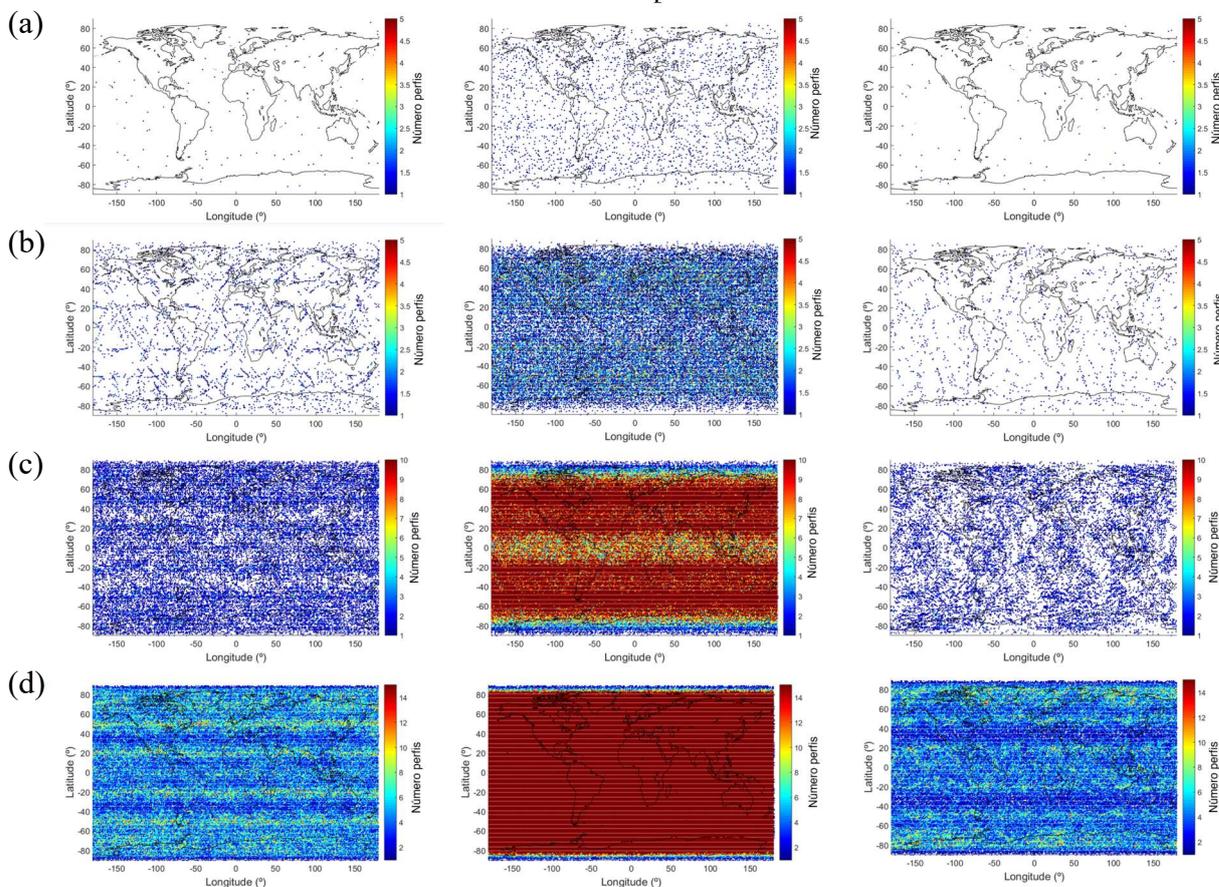
5 PERFIS DE DENSIDADE DE ELÉTRONS PROVENIENTES DE RO

Diversos produtos provenientes das missões de RO são disponibilizados pelo CDAAC (CDAAC, 2021). Entre os principais produtos ionosféricos estão os perfis chamados *ionPrf*, produto nível dois (Apêndice C) que apresenta, entre outras informações, perfis de TEC calibrado e de densidade de elétrons de uma determinada ocultação. No presente capítulo são abordados os estudos realizados utilizando perfis ionosféricos provenientes de RO. Na Seção 5.1 é apresentado um estudo sobre a cobertura das ocorrências de ocultações de três missões (COSMIC, GRACE e CHAMP) em relação ao globo e à região brasileira. A Seção 5.2 aborda a metodologia de recuperação de perfis de densidades de elétrons, a partir dos arquivos de excesso de fase, utilizada no módulo GMRION do software CDAAC. Na sequência são apresentadas as metodologias desenvolvidas no presente projeto com o auxílio de mapas ionosféricos. Por fim, é avaliado o desempenho das metodologias utilizadas pela UCAR em comparação com as metodologias propostas na presente tese, considerando medições *in situ* (Seção 5.3) e dados de ionossondas (Seção 5.4).

5.1 ANÁLISE DA COBERTURA DE DADOS DE RO

Antes da avaliação das metodologias utilizadas para a recuperação de perfis ionosféricos provenientes de RO, foi desenvolvida uma análise das missões de RO com perfis ionosféricos em relação ao número de perfis e à área de cobertura. A Figura 39 apresenta a plotagem do número de ocorrências de ocultações com perfis ionosféricos para: (a) um dia de dados; (b) um mês de dados; (c) um ano de dados; e (d) missão completa. As plotagens à esquerda correspondem a dados da missão CHAMP, as do centro à missão COSMIC e as da direita à missão GRACE. Para a obtenção das imagens foi considerado um *grid* de 1° x 1° (latitude x longitude) e para cada período de dados as escalas gráficas foram fixadas para permitir a comparação entre os dados das diferentes missões. Os dados com informações diárias, mensais e anuais correspondem ao ano seguinte ao lançamento de cada uma das missões CHAMP (2003), COSMIC (2007) e GRACE (2008). Com esses resultados fica evidente a maior concentração de perfis disponibilizados a partir da missão COSMIC. Além disso, verifica-se que para esta missão a maior quantidade de ocultações tem ocorrência em regiões de médias latitudes, diferente do observado para as missões CHAMP e GRACE.

Figura 39 – Número de perfis ionosféricos das missões CHAMP (esquerda), COSMIC (centro) e GRACE (direita) considerando: (a) um dia de dados; (b) um mês de dados; (c) um ano de dados; e (d) missão completa.



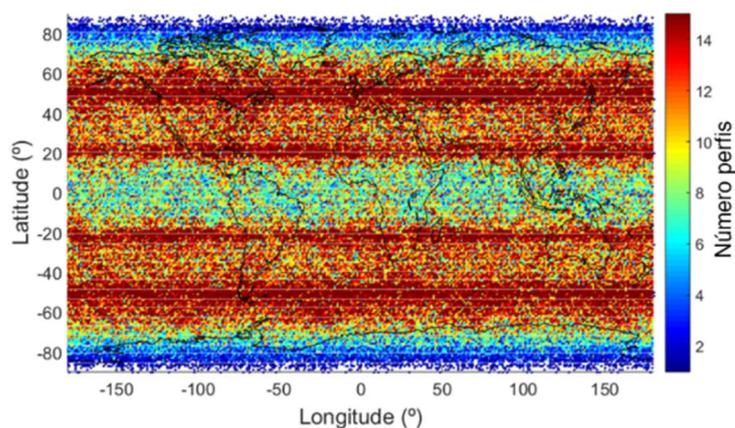
Para melhor visualização das informações da missão COSMIC, que apresenta quantidade de dados significativamente maior que as duas outras missões, a Figura 40 apresenta novamente os resultados para esta missão com escala diferente para: (a) um ano de dados; e (b) missão completa. Com isso, é possível confirmar a concentração de informações nas regiões de médias latitudes, principalmente em relação à região equatorial.

Para analisar historicamente a ocorrência das ocultações no Brasil em relação ao restante do mundo, a Figura 41 apresenta o total de ocultações por dia para todo o período de atividades das missões CHAMP, COSMIC e GRACE, considerando ocorrências para: (a) mundo; e (b) região brasileira. Apesar de apresentarem comportamento semelhante para nível regional (Brasil) e global, as ocorrências de ocultações com perfis ionosféricos na região do Brasil ficam em torno de apenas 2,7% do total. Para as missões COSMIC, CHAMP e GRACE os valores são 2,80%, 2,58% e 2,79%, respectivamente. É possível verificar ainda que a quantidade de ocultações observada nas missões CHAMP e GRACE é mais constante ao longo do tempo. A missão COSMIC apresenta mais variabilidade, com maior quantidade de dados nos anos iniciais da missão e decréscimo principalmente a partir de 2013. Como mencionado

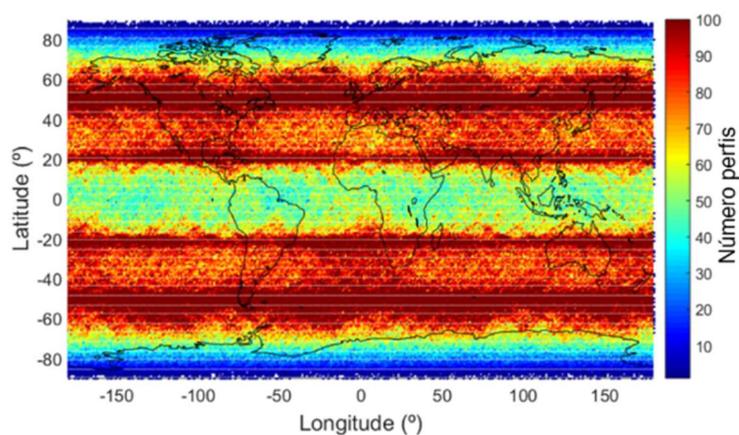
anteriormente, no dia 28 de maio de 2020 o último satélite da missão COSMIC encerrou suas atividades (NCAR & UCAR NEWS, 2020). As análises sobre a cobertura dos dados de RO foram apresentadas em Jerez et al. (2019).

Figura 40 – Número de perfis ionosféricos da missão COSMIC considerando células de $1^\circ \times 1^\circ$ (latitude x longitude) para: (a) um ano de dados (2007); e (b) missão completa.

(a)

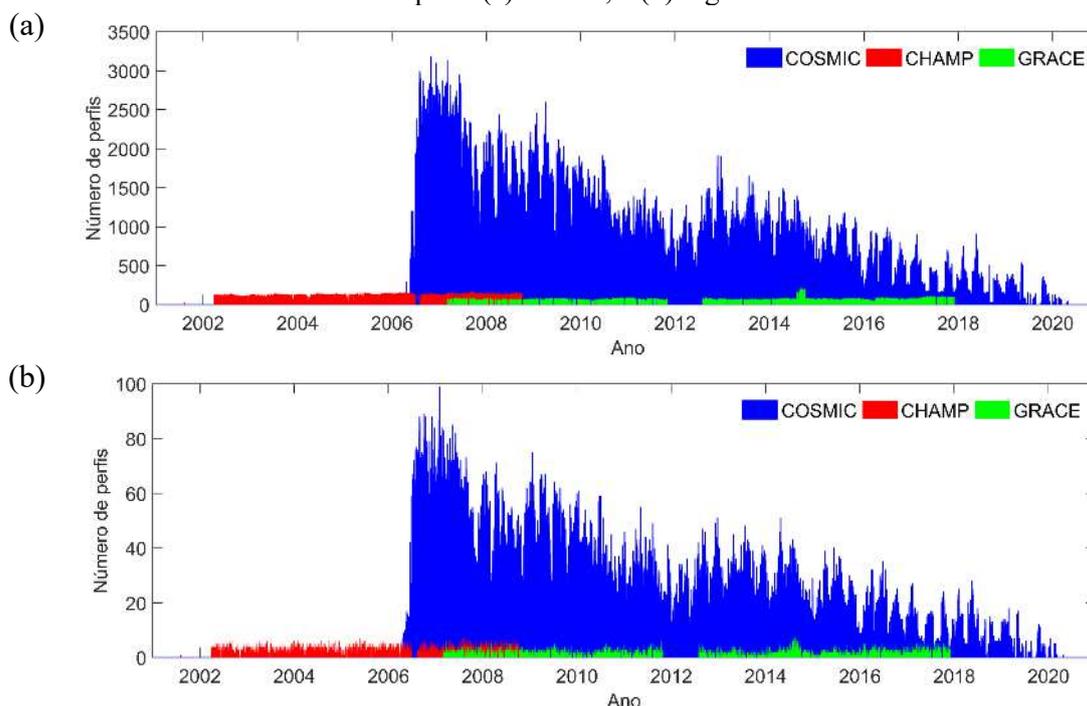


(b)



Com a missão COSMIC-2 a geometria adotada para o conjunto de satélites visa uma cobertura mais abrangente da região equatorial. Os produtos desta missão começaram a ser disponibilizados no final de 2019, e alguns estudos iniciais já indicam um aumento significativo do número de ocultações com ocorrência na região do Brasil (NESPOLO, ALVES e JEREZ, 2020). Como os arquivos de excesso de fase ainda não estão disponíveis para produtos ionosféricos, não foi possível a utilização dos dados desta missão no presente trabalho. Esses dados deverão ser utilizados e analisados em trabalhos futuros.

Figura 41 – Número de perfis ionosféricos provenientes de RO das missões CHAMP, COSMIC e GRACE para: (a) mundo; e (b) região brasileira.



5.2 METODOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE PERFIS IONOSFÉRICOS

A teoria da principal estratégia de recuperação de perfis de densidade de elétrons a partir de dados provenientes de RO, bem como estratégias alternativas, foram apresentadas nas seções 3.4.1 e 3.4.2. Na presente seção serão apresentadas as soluções computacionais empregadas na recuperação de perfis ionosféricos no módulo GMRION do software CDAAC (Seção 5.2.1), bem como as metodologias propostas na presente pesquisa com a utilização de mapas ionosféricos (Seção 5.2.2).

5.2.1 Metodologia utilizada no GMRION (CDAAC)

Além de dar nome ao centro de processamento e análise de dados da missão COSMIC, CDAAC também é o nome do sistema desenvolvido pela UCAR para realizar os processamentos de dados de missões de RO. O código do software começou a ser escrito há mais de vinte e cinco anos, com o desenvolvimento da missão GPS/MET. Até março de 2017 o sistema completo contava com mais de 1,2 milhão de linhas de código, escritas por quinze autores da UCAR. O software CDAAC em sua versão completa é considerado mais próximo de um sistema operacional do que um simples pacote de softwares. As linguagens de programação utilizadas incluem *Perl/PDL*, *Fortran*, *C/C++* e *Python* (HUNT *et al.*, 2017). O

sistema apresenta módulos para processamento em tempo real e pós-processado, suportando dados de diversas missões além das principais para as quais foi desenvolvido (COSMIC e GPS/MET).

O sistema CDAAC é dividido em módulos que realizam desde o acesso aos dados brutos até a disponibilização dos produtos finais (perfis atmosféricos). De maneira geral, a partir das informações de órbitas e relógios dos satélites LEO e GNSS, a principal divisão dos processos do sistema é entre a recuperação de dados relativos à atmosfera neutra e à ionosfera. Para a presente pesquisa os módulos de maior interesse são os que realizam a inversão dos perfis atmosféricos, sendo o ROAM utilizado para recuperação de perfis da atmosfera neutra e o GMRION utilizado para obtenção de perfis da ionosfera. No Apêndice D são apresentadas as principais características desses dois módulos com informações obtidas na documentação disponibilizada na página do CDAAC (CDAAC, 2021). É dado destaque para o módulo GMRION, que foi utilizado no desenvolvimento dessa pesquisa para a implementação da metodologia proposta.

A etapa na qual a pesquisa buscou contribuir se refere à recuperação do perfil de densidade de elétrons a partir do TEC, correspondente à Equação 45. No entanto, computacionalmente essa equação pode levar a problemas de singularidade, especificamente para as regiões próximas aos limites superior e inferior dos perfis. Como solução para esse problema, Lei et al. (2007) apresentam uma equação equivalente à Equação 45:

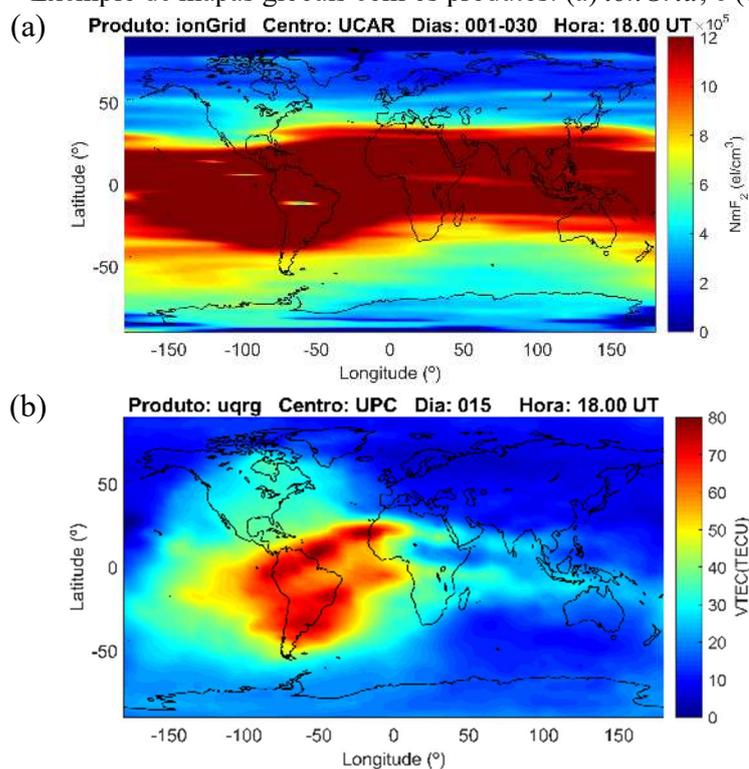
$$Ne(p_i) = c_{i,0}^{-1} \left(\frac{TEC(p_i)}{p_i} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} Ne_{(p_{i+k})} \right) \quad (72)$$

sendo $Ne(p_i)$ a densidade de elétrons considerando um dado p_i (raio tangente), $c_{i,0}^{-1}$ e $c_{i,k}$ coeficientes adimensionais baseados nos valores de p_i , $TEC(p_i)$ o TEC calibrado dado p_i e m o número de camadas acima de p_i . Deste modo, a densidade de elétrons é estimada desde o topo até a camada mais baixa do perfil.

Para considerar a variabilidade horizontal da ionosfera, Pedatella, Yue e Schreiner (2015) apresentam o uso de um fator de assimetria (Equação 55), baseado em valores provenientes de mapas de NmF₂ da própria missão COSMIC, conforme apresentado na Seção 3.4.2. Os mapas de NmF₂, denominados *ionGrid*, são produtos que apresentam os valores médios mensais de NmF₂ fornecidos em função de latitude, longitude e hora local. Os valores de NmF₂ são obtidos a partir de perfis ionosféricos estimados com a inversa de Abel clássica, assumindo simetria esférica da ionosfera. Os mapas possuem resolução de 1° x 20° (latitude x longitude) e resolução temporal de 30 minutos. Para minimizar os efeitos de erros grosseiros,

observações com diferenças superiores a um desvio padrão da média são desconsideradas. A Figura 42 apresenta um exemplo de mapas globais ionosféricos para dados de 2015 considerando o produto *ionGrid* (a), com valores de NmF_2 , e, para comparação, um exemplo de mapa com valores de VTEC, produto UQRG (b).

Figura 42 – Exemplo de mapas globais com os produtos: (a) *ionGrid*; e (b) UQRG.



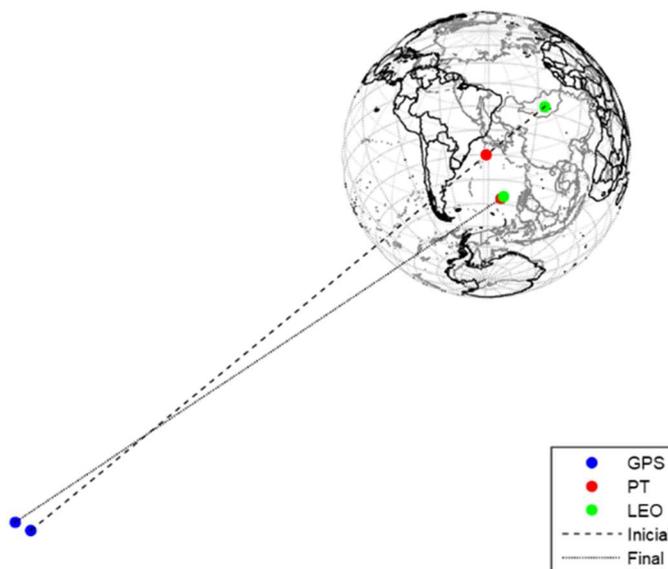
Conforme mencionado anteriormente, a metodologia de processamento proposta por Pedatella, Yue e Schreiner (2015) resultou nos produtos COSMIC denominados *igaPrf*, disponíveis na página do CDAAC para ocultações a partir de 2015.

5.2.2 Proposta com auxílio de mapas ionosféricos

Na presente pesquisa foi adotada estratégia semelhante à apresentada por Pedatella, Yue e Schreiner (2015), com a estimativa de um fator de assimetria da ionosfera, porém, com dados provenientes de mapas de VTEC, com a possibilidade da utilização de informações regionais de áreas críticas. Inicialmente foi levantada a possibilidade da utilização de mapas regionais para a representação da variação horizontal da ionosfera, uma vez que esse tipo de produto, em geral, apresenta melhor resolução. Porém, duas limitações foram observadas. Os estudos apresentados anteriormente (Seção 4.4) demonstraram que entre os mapas regionais disponíveis com grande quantidade de dados, a qualidade obtida não foi

superior a produtos globais, como o UQRG e o CODG. Outra limitação encontrada é relacionada à geometria da RO e às posições envolvidas na recuperação dos perfis e, conseqüentemente, na estimativa dos fatores de assimetria. A Figura 45 apresenta as posições dos satélites GPS e LEO e do ponto tangente no início e no final de uma ocultação.

Figura 43 – Visualização das posições dos satélites GPS e LEO e do ponto tangente (PT) no início e no final de uma ocultação.



Ainda que sejam consideradas as posições dos satélites GPS projetadas para a altitude dos satélites LEO, a geometria envolvida dificilmente resultaria em ocultações com as três posições (GPS, LEO e ponto tangente) dentro da região de cobertura dos mapas regionais. Com isso, o número de ocultações para serem avaliados na região brasileira, que já possui número limitado de ocorrências, mesmo com a missão COSMIC, ficaria ainda mais restrito. A possibilidade de utilizar diferentes mapas regionais e globais (INPE e UQRG, por exemplo) foi descartada para evitar problemas decorrentes da aplicação de mapas com diferentes resoluções. A solução mais viável encontrada para a inclusão de informações regionais foi a opção dos mapas híbridos, ainda limitada em relação à quantidade de dias com produtos disponíveis. Um breve experimento foi realizado utilizando os mapas híbridos, os resultados podem ser consultados no Apêndice H. Considerando esse cenário e o bom desempenho observado com os mapas globais, conforme apresentado nos estudos do Capítulo 4, o foco dos experimentos realizados na presente seção foi o uso dos fatores de assimetria baseados no VTEC proveniente dos GIMs.

Para os estudos realizados foram considerados três tipos de fator de assimetria da ionosfera (F_{AI}): o primeiro considerando a estimativa baseada em valores de VTEC

provenientes dos GIMs (F_{AI}^{GIM}); o segundo aplicando a proposta de Pedatella, Yue e Schreiner (2015) ($F_{AI}^{ionGrid}$); e o terceiro calculado a partir da média dos valores dos dois tipos de fatores de assimetria apresentados anteriormente (F_{AI}^{lonGIM}):

$$F_{AI}^{lonGIM} = \frac{(F_{AI}^{GIM} + F_{AI}^{ionGrid})}{2}. \quad (73)$$

Além das diferenças em relação às fontes de dados utilizadas para o cálculo dos fatores de assimetria, foram avaliadas três formas de inclusão dessas informações na Equação 72. A primeira, de maneira análoga à utilizada por Pedatella, Yue e Schreiner (2015), na qual os valores do fator de assimetria são incluídos no valor de densidade de elétrons de cada camada, utilizado no somatório da Equação (72):

$$Ne(p_i)^{EDA} = c_{i,0}^{-1} \left(\frac{TEC(p_i)}{p_i} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} Ne_{(p_{i+k})} F_{AI} \right), \quad (74)$$

sendo F_{AI} a matriz de fatores de assimetria estimados para as projeções das posições do GPS, LEO e ponto tangente para cada camada considerada. Os produtos resultantes dessa estratégia foram denominados: $gmGIM$, com fator de assimetria derivado de GIMs; $gmIonGrid$, com fator de assimetria derivado dos produtos $ionGrid$ e, portanto, equivalentes aos produtos $igaPrf$; e $gmIonGIM$, com o fator de assimetria obtido com a média dos dois produtos (GIMs e $ionGrid$). A segunda possibilidade foi realizada com a aplicação de apenas um fator de assimetria em relação ao TEC:

$$Ne(p_i)^{TA} = c_{i,0}^{-1} \left(\frac{TEC(p_i) F_{AI}}{p_i} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} Ne_{(p_{i+k})} \right). \quad (75)$$

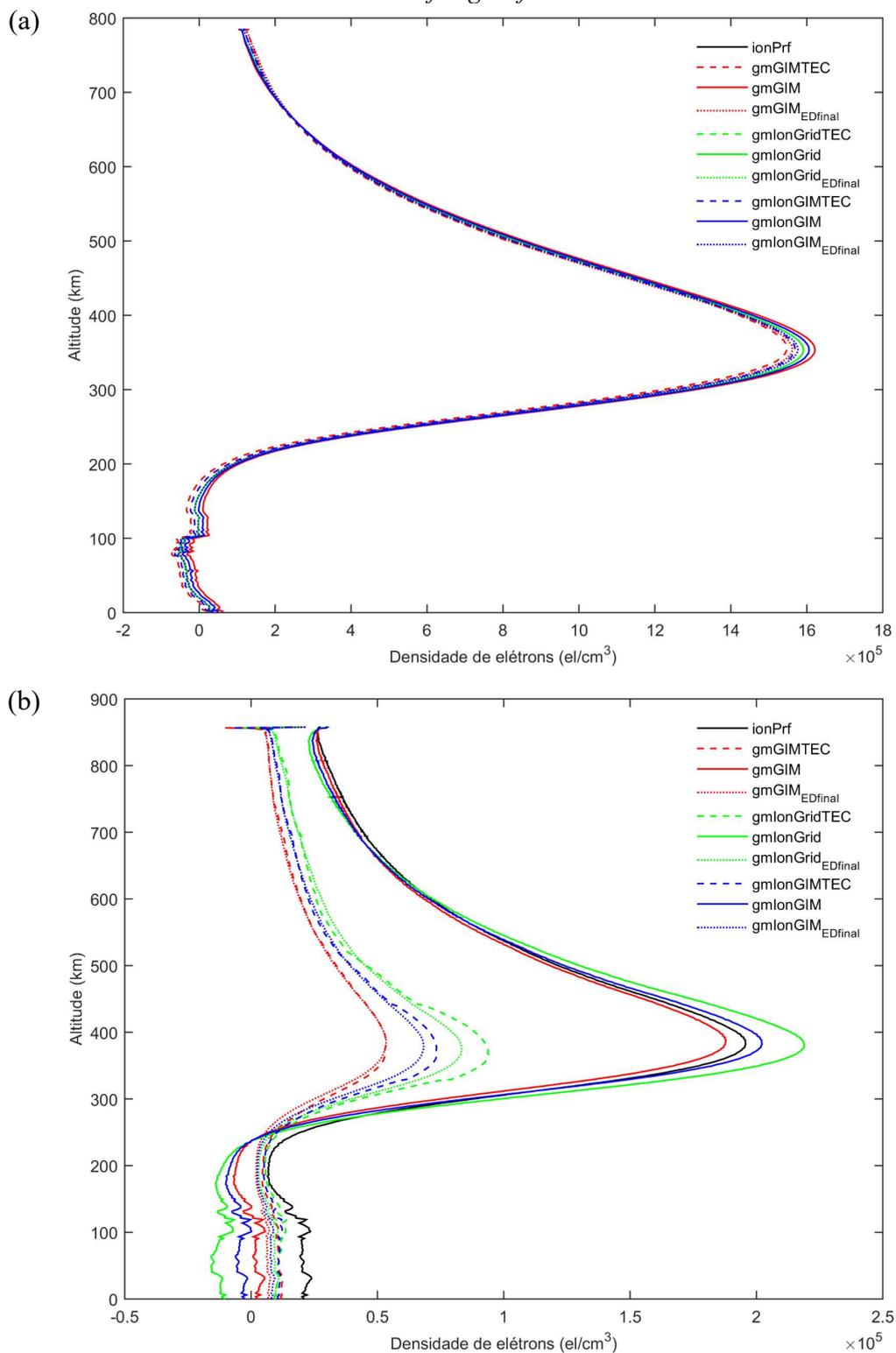
Os produtos obtidos com essa estratégia foram denominados $gmGIM_{TEC}$, com fator de assimetria derivado dos GIMs, e demais opções de maneira análoga às nomenclaturas adotadas na metodologia anterior. E a última abordagem testada foi também a aplicação de apenas um fator de assimetria, porém, utilizado diretamente no valor de densidade de elétrons final:

$$Ne(p_i)^{EDFA} = c_{i,0}^{-1} \left(\frac{TEC(p_i)}{p_i} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} Ne_{(p_{i+k})} \right) F_{AI}. \quad (76)$$

Os produtos obtidos com essa equação foram denominados $gmGIM_{EDfinal}$, com fator de assimetria derivado dos GIMs, e demais opções de maneira análoga às nomenclaturas utilizadas anteriormente. A Figura 44 apresenta dois exemplos de plotagem dos valores de densidade de elétrons de perfis $ionPrf$ e dos provenientes das abordagens propostas. É possível verificar que, de maneira geral, a maior variabilidade entre os métodos para a primeira plotagem (a) é observada na região de pico e de *bottom*. Já no segundo exemplo (b),

como na maior parte dos casos, a maior proximidade entre os resultados ocorreu com as metodologias que aplicam o fator de assimetria no somatório de densidade de elétrons, as demais abordagens apresentaram resultados mais discrepantes.

Figura 44 – Plotagem dos perfis obtidos com todas as metodologias, além dos produtos COSMIC *ionPrf* e *igaPrf*.



A avaliação dos dados provenientes de RO é, por si só, um tema desafiador. Considerando a geometria do caminho percorrido pelo sinal e as ocorrências de ocultações, para utilizar informações como referência existem limitações de região e tempo de ocorrência. Além disso, existe ainda a consideração em relação à geometria envolvida na obtenção dessas medições.

Nos trabalhos desta temática podem ser utilizadas comparações de diferentes metodologias aplicadas em dados simulados a partir de modelos ionosféricos (HERNÁNDEZ-PAJARES, JUAN e SANZ, 2000). Uma abordagem alternativa que também pode ser aplicada é a comparação com medições *in situ* provenientes de missões como GRACE, CHAMP e C/NOFS (*Communications/Navigation Outage Forecasting System*) (PEDATELLA, YUE e SCHREINER, 2015). Uma outra possibilidade é a utilização de dados de ionossondas, abordagem cujas limitações e uma possível melhoria de utilização foi apresentada na Seção 4.2 (JEREZ et al., 2020a). A seguir são apresentadas duas abordagens para a avaliação das metodologias propostas, com a utilização de medições *in situ* (Seção 5.3) e a partir de dados de ionossondas (Seção 5.4). Por fim, na Seção 5.5 são apresentadas considerações gerais sobre os dois métodos de avaliação utilizados.

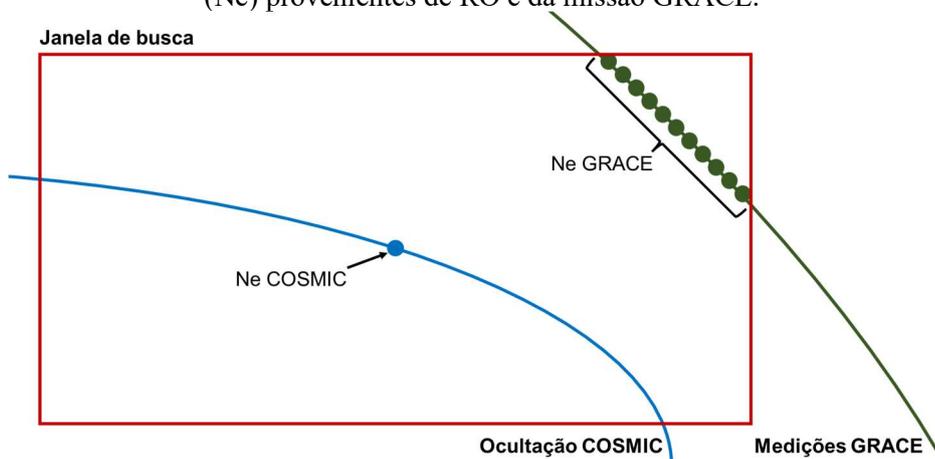
5.3 AVALIAÇÃO COM MEDIÇÕES *IN SITU*

5.3.1 *Metodologia*

A avaliação com medições *in situ* considerou dados da missão GRACE. A Figura 12 ilustra a estratégia utilizada para a comparação dos valores de densidade de elétrons provenientes dos perfis de RO com os medidos por satélites da missão GRACE. A linha azul representa os valores de densidade de elétrons dos perfis ionosféricos de RO e o ponto azul representa um valor em dada latitude, longitude, altitude e tempo. A partir de cada um desses valores assumidos como posição de referência para a definição de uma janela de busca, são verificados os valores de densidade de elétrons do GRACE cujos dados se encontrem dentro da janela definida. A partir disso, a diferença do valor obtido com a missão COSMIC é calculada em relação a todas as medidas GRACE incluídas na janela adotada. Assim, três medidas são analisadas: a discrepância obtida a partir da menor diferença de tempo entre os dados COSMIC e GRACE; a diferença obtida com a menor distância 3D entre a posição de ocorrência com COSMIC e a medição GRACE; e o valor médio das diferenças calculadas para cada valor

obtido com COSMIC e as medições GRACE pertencentes à janela de busca. Os tempos de referência em todos os casos analisados foram transformados para hora local (LT).

Figura 45 – Ilustração da estratégia utilizada para comparação dos valores de densidade de elétrons (Ne) provenientes de RO e da missão GRACE.



Para as análises foram adotadas três janelas de busca em latitude e longitude: 20°, 10° e 5°. As janelas de altitudes consideradas foram de 100 km e 50 km. Já janelas de tempo utilizadas foram de uma e duas horas. Vale ressaltar que algumas janelas consideradas correspondem a longas extensões, porém, foram adotadas visando garantir a ocorrência simultânea de dados de RO e medições *in situ* para as mesmas regiões. Essas janelas foram posteriormente reduzidas até valores em que ainda era possível observar ocorrências simultâneas entre dados de ocultações e medições *in situ*. Foram utilizados três cenários de uma semana cada, sendo um de baixo fluxo solar e dois de intenso fluxo solar, os períodos considerados são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Descrição dos cenários utilizados.

Cenário	Descrição	Dias	Ano
1	Baixo fluxo solar	234-240	2008
2	Intenso fluxo solar (equinócio)	261-267	2011
3	Intenso fluxo solar (solstício)	352-358	2011

Os resultados obtidos com os produtos *gmGIM_{TEC}* e *gmGIM_{EDfinal}*, que empregam metodologias com aplicação de apenas um fator de assimetria nos valores de TEC ou na densidade de elétrons final (equações 75 e 76), foram muito mais discrepantes que os provenientes dos produtos *ionPrf*, em alguns casos alcançando erros correspondentes a cinco vezes o obtido com *ionPrf*. Por isso, a seguir são apresentados apenas os resultados com a

abordagem correspondente ao produto *gmGIM* (Equação 74), os demais resultados podem ser consultados no Apêndice E.

5.3.2 *Resultados e análises*

Os resultados apresentados com o *ionPrf* correspondem ao produto ionosférico oficial da COSMIC, disponibilizado por meio da página do CDAAC. Os resultados *gmGIM* correspondem aos produtos cujos processamentos foram realizados no GMRION utilizando GIMs. Os resultados *gmIonGrid* foram obtidos com a metodologia que utiliza os mapas de NmF₂ da missão COSMIC (*ionGrid*) (correspondentes ao *igaPrf*). E os resultados *gmIonGIM*, são derivados dos processamentos com fator de assimetria baseado na média entre os fatores obtidos com GIM e *ionGrid*.

As diferenças absolutas médias obtidas com janelas de 20°, 10° e 5° (em latitude e longitude), de 100 km (em altitude) e de 4 horas, considerando os três cenários e os mapas globais UQRG, são apresentados na Tabela 12. De modo geral, é possível verificar que os quatro tipos de produtos ionosféricos analisados apresentaram discrepâncias com ordem de grandeza semelhante. Para o cenário 1 (baixo fluxo solar), os produtos obtidos com GIMs apresentaram o melhor desempenho para as três janelas de latitude e longitude, com exceção de duas ocorrências com o *gmIonGIM*. O pior desempenho neste caso foi obtido com o *gmIonGrid* para janelas de 20° e 10°, e com o *ionPrf* para janela de 5°. Nos cenários 2 e 3 (intenso fluxo solar), o *ionPrf* apresentou o melhor desempenho em todas as configurações, enquanto os produtos obtidos com GIMs apresentaram o pior desempenho em todas as opções de janelas consideradas, com exceção de um caso, considerando a menor diferença em tempo com janela de 20°, em que o produto *gmIonGrid* apresentou o pior desempenho.

Com a diminuição da janela de tempo para 2 horas e mantendo as demais janelas (20°, 10° e 5°, em latitude e longitude, e 100 km em altitude), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 13. Com a janela de tempo mais restrita, o desempenho dos produtos *gmIonGrid* foi o melhor para a maior parte dos casos considerando os cenários 1 e 2, com exceção de três casos em que o *gmIonGIM* apresentou os melhores resultados e um caso em que o *ionPrf* apresentou o melhor desempenho. O pior desempenho foi obtido com o *ionPrf*, para o cenário 1 (com duas exceções em que *gmGIM* foi pior), e com o *gmGIM*, para o cenário 2 (com uma exceção em que *ionPrf* foi pior). O cenário 3 apresentou o comportamento mais atípico, considerando todas as configurações adotadas, com as diferenças mais significativas

entre os erros obtidos com cada um dos quatro produtos. Neste caso, o *gmGIM* apresentou os melhores desempenhos para todas as janelas, enquanto o *ionPrf* apresentou o pior desempenho na maior parte dos casos, com exceção de um caso em que *gmIonGrid* apresentou piores resultados.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos com o aumento da restrição da janela em altitude, agora considerando 50 km. As janelas em latitude e longitude foram mantidas (20°, 10° e 5°) e a janela de tempo considerada, neste caso, foi de quatro horas. No cenário 1, novamente o *gmGIM* apresentou o melhor desempenho na maior parte dos casos, com exceção de duas ocorrências de melhores resultados com *gmIonGIM*. O pior desempenho neste cenário foi com *gmIonGrid*. Com os cenários 2 e 3, os melhores resultados foram obtidos com *ionPrf*, as duas únicas exceções foram com o *gmIonGIM*. Para esses cenários, o pior desempenho foi obtido com *gmGIM*, exceto para a janela de 20° considerando o cenário 2, em que o *gmIonGrid* apresentou os piores resultados.

A configuração mais restrita é apresentada na Tabela 15, com janela em altitude de 50 km e em tempo de 2 horas. Novamente as janelas de 20°, 10° e 5°, em latitude e longitude, foram utilizadas. Para o cenário 1, o melhor desempenho não teve uma concentração grande em um só produto, mas as maiores ocorrências foram com o *gmGIM*, além de duas ocorrências com *ionPrf* e duas com *gmIonGIM*. Os piores desempenhos foram obtidos com *ionPrf*, exceto em dois casos em que o *gmGIM* apresentou os piores resultados. Considerando o cenário 2, o *gmIonGrid* apresentou o melhor desempenho, exceto em dois casos em que o *ionPrf*, apresentou os melhores resultados. O pior desempenho em todos os casos deste cenário foi obtido com o *gmGIM*. Para o cenário 3, esta configuração apresentou correspondência entre os dados de RO e os provenientes da missão GRACE apenas com a janela de 20° em latitude e longitude. Neste caso, o melhor desempenho foi obtido com *ionPrf* e o pior com *gmGIM*.

De forma geral, os resultados obtidos com a comparação dos resultados das metodologias de recuperação de perfis de densidade de elétrons com medições *in situ* da missão GRACE mostraram a compatibilidade dos diferentes produtos ao se considerar a ordem de grandeza das diferenças absolutas obtidas. A única exceção, com resultados mais discrepantes, foi o cenário 3 apresentado na Tabela 13, conforme mencionado anteriormente. Para analisar o desempenho dos produtos em períodos mais longos, foram utilizados dados de ionossondas considerando dois anos de dados, conforme Seção 5.4.

Tabela 12 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 4 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	1,7941	1,7531	1,7715	1,8090
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	2,0302	2,0277	2,0231	2,0326
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	2,0336	2,0226	2,0270	2,0482
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	2,1374	2,0960	2,1116	2,1523
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	2,0182	2,0117	2,0237	2,0607
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	2,1514	2,1354	2,1461	2,1795
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	1,9263	1,8669	1,8717	1,9001	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,8869	1,8391	1,8403	1,8668	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,9194	1,8714	1,8692	1,8928	
Cenário 2	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	4,0516	4,2155	4,0926	4,1438
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	7,4345	7,7186	7,7590	7,8403
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	5,3374	5,5328	5,4467	5,4726
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	2,7648	3,4872	2,9418	2,7995
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	8,8962	10,0616	9,4709	8,9940
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	4,9252	5,4657	5,1051	4,9630
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	2,1164	3,5780	2,5185	2,3371	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	10,2923	12,9807	11,7259	10,5374	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	5,2063	5,7163	5,4285	5,4239	
Cenário 3	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	19,6040	20,9052	20,5647	20,4247
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	21,2464	23,6916	22,9900	22,4703
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	20,5436	22,2828	21,8361	21,5419
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	20,7764	22,6683	22,3874	22,1829
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	17,5691	19,1698	18,9472	18,8332
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	20,5576	22,4913	22,1894	21,9551
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	22,5759	24,4532	24,1664	23,9654	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	19,3523	20,7410	20,6595	20,6409	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	22,8236	24,6644	24,4328	24,2358	

Tabela 13 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 2 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	2,1969	2,0920	2,1230	2,1754
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	3,1094	3,1749	3,1608	3,1562
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	2,6637	2,6057	2,6015	2,6139
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	1,7612	1,7043	1,6880	1,6849
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,4178	1,4650	1,4224	1,4004
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,7716	1,7141	1,6952	1,6909
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	1,7048	1,6251	1,6071	1,6079	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,6751	1,6463	1,6169	1,6112	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,7257	1,6436	1,6241	1,6247	
Cenário 2	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	1,5708	1,6547	1,4904	1,3116
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,5205	1,5717	1,4148	1,2450
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,5741	1,5692	1,4287	1,2773
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	1,5277	1,6341	1,4659	1,2837
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,4669	1,6100	1,4342	1,2414
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,5188	1,5944	1,4351	1,2621
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	1,5090	1,6059	1,4413	1,2636	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,5007	1,6651	1,4856	1,2904	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,5066	1,5957	1,4345	1,2591	
Cenário 3	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	13,7778	11,1752	12,1542	13,4183
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	23,5490	21,7451	22,4804	23,5022
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	19,0958	18,9663	19,1806	19,5427
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	10,4331	3,2002	5,3411	8,0930
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	23,8956	16,3620	18,8036	21,5555
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	13,5168	11,0561	11,6266	12,5234
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	10,5591	3,5431	5,5091	8,2320	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	18,3808	10,7636	13,3309	16,0537	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	12,9747	7,2263	8,8785	10,9659	

Tabela 14 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 50 km em altitude e 4 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	1,6005	1,5518	1,5775	1,6231
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,8560	1,8365	1,8389	1,8577
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,8671	1,8477	1,8574	1,8854
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	1,7464	1,6841	1,7135	1,7716
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,6053	1,5918	1,6060	1,6540
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,7719	1,7415	1,7636	1,8102
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	1,5331	1,5068	1,5102	1,5411	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,4480	1,4360	1,4323	1,4590	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,5414	1,5279	1,5244	1,5490	
Cenário 2	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	3,6975	3,7969	3,8253	4,0156
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	6,7292	7,0439	7,1662	7,2951
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	5,0801	5,3026	5,3036	5,3834
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	2,8681	3,2659	2,8483	2,8771
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	7,6977	8,7018	8,1916	7,8108
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	4,8169	5,3733	5,0424	4,8277
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	2,5683	3,0298	2,3824	2,9181	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	9,6217	12,0973	11,0236	9,9912	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	5,3313	6,1253	5,8384	5,6783	
Cenário 3	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	17,5277	19,3676	18,9563	18,6248
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	18,9711	21,7524	20,8768	20,1238
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	18,0459	20,2193	19,6820	19,2688
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	19,5436	22,1344	21,6143	21,1457
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	13,7608	16,3492	15,7711	15,3758
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	18,7202	21,3772	20,8194	20,3530
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	22,3504	25,1542	24,6715	24,1637	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	17,3576	19,8083	19,3385	18,9444	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	22,4197	25,1824	24,7005	24,2031	

Tabela 15 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 50 km em altitude e 2 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	2,0066	1,8746	1,9110	1,9621
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	2,9704	3,0277	3,0127	3,0059
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	2,5428	2,4664	2,4651	2,4788
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	1,3358	1,2212	1,2358	1,2606
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	0,9332	0,9821	0,9438	0,9355
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,3827	1,2863	1,2879	1,3049
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	1,2436	1,1100	1,1183	1,1411	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	1,1739	1,0979	1,0949	1,1115	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	1,2710	1,1332	1,1387	1,1610	
Cenário 2	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	0,8582	1,1805	0,9848	0,8059
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	0,8139	1,0747	0,8916	0,7303
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	0,9051	1,0555	0,9058	0,7802
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	0,7979	1,1659	0,9581	0,7681
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	0,7800	1,2220	0,9973	0,7865
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	0,8105	1,1178	0,9274	0,7556
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	0,7384	1,1420	0,9244	0,7281	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	0,7701	1,3135	1,0650	0,8324	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	0,7431	1,1307	0,9202	0,7286	
Cenário 3	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	8,5695	11,8204	10,8909	10,0243
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	19,4889	23,9237	22,8911	21,8132
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	12,6301	16,8928	15,8218	14,7478
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
	Min dist (10^4 el/cm ³)	*	*	*	*
	Min tempo (10^4 el/cm ³)	*	*	*	*
	Erro médio (10^4 el/cm ³)	*	*	*	*
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
Min dist (10^4 el/cm ³)	*	*	*	*	
Min tempo (10^4 el/cm ³)	*	*	*	*	
Erro médio (10^4 el/cm ³)	*	*	*	*	

* Não houve ocorrência simultânea entre dados COSMIC e GRACE para essa configuração.

5.4 AVALIAÇÃO COM MEDIÇÕES DE IONOSSONDA

5.4.1 Metodologia

Para a avaliação dos perfis obtidos com as metodologias apresentadas a partir de dados de ionossondas foi utilizada a comparação direta com as medições, sem interpolação baseada nos valores de VTEC provenientes de GIMs (Seção 4.2). A motivação para o uso de medições diretas foi devido à utilização de GIMs em duas das metodologias de recuperação de perfis de RO. Com isso, a utilização de mapas globais também na validação poderia comprometer de certa forma a avaliação das metodologias, uma vez que, mesmo com o uso de diferentes GIMs (para a recuperação dos perfis e para a avaliação), a maior parte das estações GNSS utilizadas para a geração dos produtos são as mesmas (provenientes da rede IGS). Além disso, em um estudo desenvolvido para a avaliação do desempenho de dois produtos COSMIC (*ionPrf* e *igaPrf*) para a região brasileira, foram comparadas as duas metodologias (com e sem interpolação baseada em GIMs). Neste estudo, apesar de ser verificada a diminuição do erro obtido ao se utilizar a interpolação dos valores de referência, o comportamento dos resultados em relação a qual produto obteve melhor desempenho não teve variação. Mais detalhes podem ser consultados em Jerez et al. (2021c).

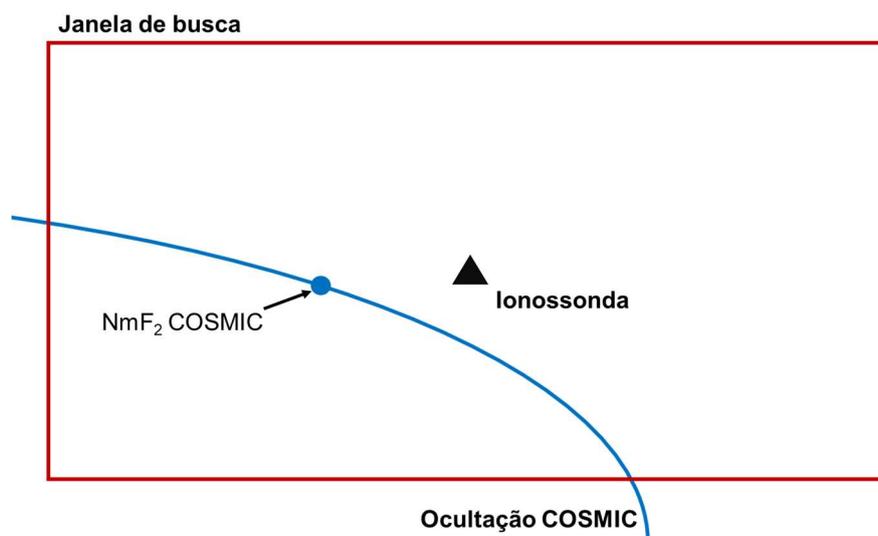
Para a avaliação dos perfis provenientes de RO com dados de ionossondas foram utilizadas as quatro estações do INPE apresentadas anteriormente (Figura 12). Diferente da Seção 5.3, neste caso apenas um ponto por perfil é avaliado, uma vez que são adotados como referência os valores de pico da camada F₂ medidos com as ionossondas. Para o estudo foram consideradas três medidas: foF₂, NmF₂ e hmF₂. Os horários associados aos dados de RO e de referência foram transformados para hora local (LT). Os perfis avaliados foram aqueles com ocorrência dentro de uma janela de busca com base na posição de referência das ionossondas. As janelas utilizadas foram de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude (Figura 46).

Os produtos ionosféricos utilizados para a recuperação de perfis de RO foram o UQRG e o CODG. Os períodos analisados foram os anos de 2014 e 2015. Nas análises foram considerados também os valores médios de distância entre as posições de ocorrência das ocultações e as posições das ionossondas consideradas, bem como o número de ocultações ocorridas para cada cenário. Para as análises foram utilizadas as diferenças médias absolutas obtidas entre os valores dos perfis de RO e os medidos com as ionossondas. Além desses, foram considerados também os valores médios das diferenças relativas (*Dif*), estimadas como:

$$Dif_{NmF_2} = 100 \left(\frac{NmF_{2ion0} - Nm_{2RO}}{NmF_{2ion0}} \right), \quad (77)$$

sendo $NmF_{2_{iono}}$ o valor de densidade máxima de elétrons medido com a ionossonda e $NmF_{2_{RO}}$ o valor de densidade máxima de elétrons obtido com o perfil de RO. Para as diferenças relativas de foF_2 e hmF_2 foi utilizada a mesma estratégia. Em todos os casos foram utilizadas as diferenças absolutas, devido ao uso de valores médios dos erros obtidos para a realização das análises.

Figura 46 – Ilustração da estratégia utilizada para comparação dos valores de NmF_2 provenientes de RO com os provenientes de ionossondas.



Assim como a avaliação com dados *in situ*, os resultados obtidos com os produtos $gmGIM_{TEC}$ e $gmGIM_{EDfinal}$ apresentaram diferenças muito discrepantes em relação aos demais produtos, em alguns casos alcançando erros equivalentes a três vezes os valores obtidos com *ionPrf*. Com isso, novamente foram analisados apenas os resultados provenientes da metodologia correspondente ao produto $gmGIM$. Os demais resultados podem ser verificados no Apêndice F.

5.4.2 Resultados e análises

A Tabela 16 apresenta as diferenças médias absolutas obtidas entre os dados de RO e os medidos por ionossondas para dados de 2014, as metodologias que utilizaram dados de GIM são provenientes dos produtos UQRG. Com janela de 20° em latitude e longitude, os melhores resultados foram obtidos com *ionPrf*, com exceção de dois casos em que os menores erros foram obtidos com $gmGIM$ e $gmIonGIM$. Os piores resultados foram obtidos com $gmIonGrid$, com exceção de um caso em que o pior desempenho foi obtido com $gmGIM$. Com

a diminuição da janela para 10°, o melhor desempenho passa a ser observado com o *gmGIM*, com exceção de três casos em que o *ionPrf* e um em que o *gmIonGIM* obtiveram os menores erros. Na maior parte dos casos, o *gmIonGrid* apresentou os piores resultados, com exceção de dois casos em que o pior desempenho foi observado com o *ionPrf*. Com a janela de 5° é observado comportamento semelhante, com a maior parte dos casos com melhor desempenho do *gmGIM* e pior desempenho do *gmIonGIM*, neste caso com exceções mais dispersas para ambos os casos, sendo que todos os produtos tiveram ocorrência de melhor e pior desempenho. É possível verificar ainda o impacto do tamanho das janelas consideradas em latitude e longitude na distância média da ocorrência dos perfis e, conseqüentemente, no número de perfis considerados. Por exemplo, a partir da Tabela 17 para a estação BVJ03 observa-se que de uma janela para outra os valores médios de distância entre as ocorrências de ocultações e as ionossondas é em torno da metade e o número de perfis obtidos é em torno de um quarto dos valores obtidos com a janela anterior. Os resultados com os erros relativos apresentaram comportamento semelhante na maior parte dos casos, todos os resultados são apresentados no Apêndice G.

A Tabela 17 apresenta os resultados com as mesmas configurações e produtos da tabela anterior, para dados do ano de 2015. Com a janela de 20°, a maior parte das ocorrências de melhor desempenho é observada com o *ionPrf*, sendo que quatro ocorrências foram obtidas com *gmGIM* e uma com *gmIonGIM*. O pior desempenho foi observado nos resultados do *gmIonGrid*, com três exceções ocorridas com *gmGIM*. Com a janela de 10°, o melhor desempenho se concentra nos produtos *gmGIM*, com duas exceções para o *ionPrf* e uma para o *gmIonGIM*. Os piores resultados foram obtidos com *gmIonGrid*, com exceção de duas ocorrências com *ionPrf*. Com a janela mais restrita (5°), os melhores resultados foram obtidos com *gmGIM*, sendo observadas quatro exceções, duas com *gmIonGIM* e duas com *gmIonGrid*. Os piores resultados foram obtidos com *gmIonGrid*, com exceção de quatro casos em que *ionPrf* teve o pior desempenho.

Para as análises utilizando dados de ionossonda como referência também foram consideradas as metodologias com a aplicação do produto CODG. Os erros médios absolutos obtidos com dados de 2014 são apresentados na Tabela 18. Com a janela de 20°, o melhor desempenho foi obtido com *ionPrf*, na maior parte dos casos, com três ocorrências com *gmGIM*, duas com *gmIonGIM* e uma com *gmIonGrid*. O pior desempenho foi obtido com *gmIonGrid* para a maior parte dos casos, com duas ocorrências com *gmGIM* e uma com *ionPrf*. Com janela de 10°, o melhor desempenho foi obtido com *gmGIM*, as exceções foram uma ocorrência para *ionPrf* e uma com *gmIonGIM*. O pior desempenho foi observado com

gmIonGrid, com apenas três exceções, sendo duas com *ionPrf* e uma com *gmGIM*. Com janela de 5°, os melhores desempenhos foram observados com *gmGIM*, as exceções foram duas ocorrências com *gmIonGIM* e uma com *ionPrf*. Os piores resultados foram obtidos com *gmIonGrid*, com exceção de duas ocorrências, uma com *ionPrf* e uma com *gmIonGIM*.

Os resultados obtidos com CODG para 2015 são apresentados na Tabela 19. Com a janela de 20°, o melhor desempenho foi observado com *gmGIM* (seis ocorrências) e *ionPrf* (cinco ocorrências), além de uma ocorrência com *gmIonGIM*. O pior desempenho foi obtido com *gmIonGrid*, com uma única exceção, com ocorrência com *gmGIM*. Com a janela de 10°, todas as ocorrências de melhor desempenho foram obtidas com *gmGIM*. O pior desempenho foi observado com *gmIonGrid*, com apenas uma ocorrência com *ionPrf*. Com janela de 5°, o melhor desempenho se manteve com *gmGIM* na maior parte dos casos, as exceções foram obtidas com *gmIonGIM* e *gmIonGrid*, com duas ocorrências cada. O pior desempenho foi obtido com *gmIonGrid*, com quatro ocorrências utilizando *ionPrf*.

De modo geral, assim como observado com os dados *in situ*, os resultados obtidos com dados de ionossonda como referência mostraram compatibilidade entre os erros obtidos com os quatro produtos analisados, com valores com ordem de grandeza próximos. Foi possível verificar que os resultados apresentaram um comportamento semelhante, sendo observada melhoria do desempenho da abordagem proposta (*gmGIM*) com a utilização de ocultações com ocorrência mais próxima aos dados de referência (janelas menores).

Tabela 16 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2014, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	808	869	foF ₂ (MHz)	1,30	1,32	1,36	1,43
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,27	3,27	3,37	3,54
			hmF ₂ (km)	35,32	35,60	35,37	36,01
SAA0K	851	636	foF ₂ (MHz)	0,95	1,02	1,01	1,04
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,11	2,28	2,26	2,33
			hmF ₂ (km)	39,70	40,41	39,90	39,95
FZA0M	836	1167	foF ₂ (MHz)	0,94	1,02	1,02	1,06
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,10	2,26	2,27	2,34
			hmF ₂ (km)	40,45	40,16	40,10	40,67
CAJ2M	770	134	foF ₂ (MHz)	1,06	1,08	1,07	1,10
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,67	2,73	2,74	2,84
			hmF ₂ (km)	37,77	37,49	37,70	38,12
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	406	248	foF ₂ (MHz)	1,13	1,06	1,14	1,28
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,82	2,59	2,80	3,12
			hmF ₂ (km)	31,01	31,16	31,02	31,83
SAA0K	417	155	foF ₂ (MHz)	0,77	0,74	0,76	0,83
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,81	1,75	1,79	1,96
			hmF ₂ (km)	27,90	28,89	29,41	29,54
FZA0M	441	295	foF ₂ (MHz)	0,81	0,79	0,84	0,92
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,74	1,71	1,81	1,98
			hmF ₂ (km)	35,65	34,18	33,92	34,77
CAJ2M	364	37	foF ₂ (MHz)	0,93	0,91	0,91	0,96
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,23	2,24	2,26	2,36
			hmF ₂ (km)	34,08	32,93	33,60	33,65
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	197	61	foF ₂ (MHz)	1,21	1,11	1,18	1,30
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,89	2,66	2,80	3,05
			hmF ₂ (km)	26,68	27,81	26,51	27,57
SAA0K	218	43	foF ₂ (MHz)	0,68	0,67	0,68	0,72
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	2,00	2,02	2,13
			hmF ₂ (km)	23,40	24,56	24,58	24,37
FZA0M	213	73	foF ₂ (MHz)	0,79	0,70	0,76	0,85
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,77	1,57	1,70	1,89
			hmF ₂ (km)	41,03	35,26	34,96	34,87
CAJ2M	221	15	foF ₂ (MHz)	1,28	1,13	1,21	1,30
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,90	2,62	2,80	2,99
			hmF ₂ (km)	42,44	42,07	42,90	42,09

Tabela 17 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2015, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Station	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	810	740	foF ₂ (MHz)	1,42	1,44	1,45	1,47
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,50	3,51	3,53	3,59
			hmF ₂ (km)	37,70	37,58	37,74	38,36
SAA0K	861	916	foF ₂ (MHz)	1,03	1,06	1,04	1,05
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,26	2,32	2,28	2,31
			hmF ₂ (km)	44,85	44,63	44,42	45,24
FZA0M	825	885	foF ₂ (MHz)	1,13	1,15	1,16	1,18
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,45	2,51	2,51	2,56
			hmF ₂ (km)	40,35	41,00	40,65	40,97
CAJ2M	773	1607	foF ₂ (MHz)	1,04	1,03	1,05	1,09
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,06	2,02	2,06	2,15
			hmF ₂ (km)	33,46	32,21	32,39	33,70
Janela: 10°							
Station	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	429	214	foF ₂ (MHz)	1,17	1,13	1,14	1,17
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,88	2,77	2,79	2,88
			hmF ₂ (km)	29,32	28,17	29,06	30,00
SAA0K	443	220	foF ₂ (MHz)	0,93	0,91	0,92	0,95
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,02	1,96	1,99	2,07
			hmF ₂ (10 ⁵ km)	43,79	42,36	42,84	44,17
FZA0M	419	236	foF ₂ (MHz)	0,87	0,88	0,88	0,91
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	1,99	1,99	2,07
			hmF ₂ (km)	38,93	37,74	38,78	39,97
CAJ2M	399	490	foF ₂ (MHz)	0,82	0,77	0,80	0,86
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,53	1,44	1,51	1,63
			hmF ₂ (km)	25,77	24,38	24,26	25,86
Janela: 05°							
Station	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	204	55	foF ₂ (MHz)	1,27	1,21	1,21	1,24
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,06	2,91	2,90	2,98
			hmF ₂ (km)	32,31	32,19	32,85	33,86
SAA0K	203	62	foF ₂ (MHz)	0,85	0,75	0,79	0,85
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,95	1,75	1,83	1,96
			hmF ₂ (km)	46,12	42,88	40,15	38,88
FZA0M	229	42	foF ₂ (MHz)	0,70	0,65	0,70	0,78
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,48	1,35	1,46	1,65
			hmF ₂ (km)	30,32	29,72	29,86	29,25
CAJ2M	202	133	foF ₂ (MHz)	0,67	0,60	0,63	0,69
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,13	1,01	1,08	1,20
			hmF ₂ (km)	27,85	26,87	26,97	28,30

Tabela 18 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2014, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	808	871	foF ₂ (MHz)	1,30	1,28	1,32	1,39
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,28	3,18	3,29	3,46
			hmF ₂ (km)	35,34	35,46	35,10	35,75
SAA0K	851	637	foF ₂ (MHz)	0,95	0,97	0,97	1,00
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,12	2,17	2,17	2,24
			hmF ₂ (km)	39,69	39,92	39,55	39,34
FZA0M	837	1170	foF ₂ (MHz)	0,95	0,98	0,98	1,01
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,12	2,18	2,19	2,26
			hmF ₂ (km)	40,42	39,98	39,61	40,25
CAJ2M	772	136	foF ₂ (MHz)	1,04	1,10	1,07	1,09
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,63	2,76	2,73	2,81
			hmF ₂ (km)	37,80	37,14	37,73	38,14
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	406	249	foF ₂ (MHz)	1,13	1,06	1,12	1,25
			NmF ₂ (el/cm ³)	2,82	2,61	2,77	3,09
			hmF ₂ (km)	30,97	30,19	30,35	31,26
SAA0K	417	155	foF ₂ (MHz)	0,77	0,73	0,75	0,81
			NmF ₂ (el/cm ³)	1,81	1,72	1,76	1,91
			hmF ₂ (km)	27,90	28,98	29,34	29,39
FZA0M	441	295	foF ₂ (MHz)	0,81	0,77	0,81	0,88
			NmF ₂ (el/cm ³)	1,74	1,68	1,76	1,92
			hmF ₂ (km)	35,65	33,62	33,32	34,21
CAJ2M	364	37	foF ₂ (MHz)	0,93	0,88	0,90	0,96
			NmF ₂ (el/cm ³)	2,23	2,15	2,21	2,36
			hmF ₂ (km)	34,08	32,98	33,66	33,65
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	197	61	foF ₂ (MHz)	1,21	1,14	1,20	1,30
			NmF ₂ (el/cm ³)	2,89	2,70	2,83	3,05
			hmF ₂ (km)	26,68	26,56	26,08	27,57
SAA0K	218	43	foF ₂ (MHz)	0,68	0,64	0,66	0,70
			NmF ₂ (el/cm ³)	1,97	1,87	1,94	2,06
			hmF ₂ (km)	23,40	23,88	23,44	23,92
FZA0M	213	73	foF ₂ (MHz)	0,79	0,74	0,79	0,85
			NmF ₂ (el/cm ³)	1,77	1,64	1,75	1,87
			hmF ₂ (km)	41,03	35,08	34,87	35,00
CAJ2M	221	15	foF ₂ (MHz)	1,28	1,16	1,23	1,30
			NmF ₂ (el/cm ³)	2,90	2,66	2,83	2,99
			hmF ₂ (km)	42,44	41,68	42,88	42,09

Tabela 19 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2015, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	809	751	foF ₂ (MHz)	1,42	1,41	1,43	1,46
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,51	3,46	3,51	3,60
			hmF ₂ (km)	37,74	36,86	37,66	38,41
SAA0K	862	923	foF ₂ (MHz)	1,03	1,04	1,03	1,05
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,26	2,30	2,28	2,31
			hmF ₂ (km)	44,84	44,84	44,83	45,25
FZA0M	825	889	foF ₂ (MHz)	1,12	1,14	1,14	1,17
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,42	2,47	2,48	2,53
			hmF ₂ (km)	40,42	41,34	41,00	41,05
CAJ2M	773	1610	foF ₂ (MHz)	1,05	1,04	1,05	1,09
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,06	2,05	2,08	2,15
			hmF ₂ (km)	33,55	31,94	32,73	33,79
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	428	216	foF ₂ (MHz)	1,20	1,17	1,17	1,21
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,02	2,88	2,92	3,02
			hmF ₂ (km)	30,47	28,45	30,24	31,15
SAA0K	443	221	foF ₂ (MHz)	0,93	0,92	0,92	0,95
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,02	1,98	2,00	2,07
			hmF ₂ (km)	43,65	42,28	43,69	44,03
FZA0M	419	236	foF ₂ (MHz)	0,87	0,86	0,87	0,91
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	1,95	1,98	2,07
			hmF ₂ (km)	38,93	38,64	39,44	39,97
CAJ2M	398	492	foF ₂ (MHz)	0,82	0,77	0,81	0,87
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,55	1,46	1,53	1,64
			hmF ₂ (km)	26,14	24,13	24,92	26,23
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
BVJ03	205	56	foF ₂ (MHz)	1,42	1,39	1,37	1,39
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,59	3,47	3,45	3,51
			hmF ₂ (km)	36,82	36,44	37,30	38,35
SAA0K	229	42	foF ₂ (MHz)	0,85	0,80	0,82	0,85
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,95	1,90	1,93	1,96
			hmF ₂ (km)	46,12	41,46	40,14	38,88
FZA0M	203	62	foF ₂ (MHz)	0,70	0,63	0,69	0,78
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,48	1,31	1,45	1,65
			hmF ₂ (km)	30,32	30,42	29,51	29,25
CAJ2M	202	135	foF ₂ (MHz)	0,69	0,61	0,65	0,71
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,20	1,08	1,15	1,26
			hmF ₂ (km)	29,17	27,58	29,61	29,61

5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, os experimentos realizados com medições *in situ* e com ionossondas (seções 4.3 e 4.4, respectivamente) permitiram verificar a compatibilidade entre os resultados obtidos com os quatro produtos analisados, que, em geral, obtiveram discrepâncias com ordem de grandeza semelhante. Para sumarizar os resultados obtidos, a Tabela 20 apresenta a porcentagem de ocorrências de melhor e pior desempenho para cada produto, considerando os diversos cenários analisados. São destacados os melhores e os piores desempenhos em azul e vermelho, respectivamente.

Tabela 20 – Desempenho geral das metodologias avaliadas para cada cenário considerando as janelas de 05°, 10° e 20°.

Avaliação	GIM	Cenário	Desempenho	ionPrf	gmGIM	gmIonGIM	gmIonGrid
<i>In situ</i>	UQRG	1	Melhor	8%	56%	25%	11%
			Pior	47%	11%	0%	42%
		2	Melhor	50%	0%	6%	44%
			Pior	3%	86%	0%	11%
		3	Melhor	70%	30%	0%	0%
			Pior	27%	70%	0%	3%
Ionossonda	UQRG	2014	Melhor	42%	47%	8%	3%
			Pior	8%	6%	6%	81%
		2015	Melhor	25%	58%	11%	17%
			Pior	17%	8%	0%	75%
	CODG	2014	Melhor	22%	61%	14%	3%
			Pior	11%	6%	6%	78%
		2015	Melhor	14%	72%	8%	6%
			Pior	14%	3%	0%	83%

Considerando os resultados com dados *in situ* como referência, o produto *gmGIM* teve melhor desempenho para o cenário 1 (baixo fluxo solar), para o mesmo cenário, o pior desempenho foi observado com *ionPrf*. Já para os cenários 2 e 3 (intenso fluxo solar), o comportamento se inverte, sendo *ionPrf* o produto com melhor desempenho, enquanto *gmGIM* apresentou as maiores ocorrências de pior desempenho. Para os resultados com ionossondas, considerando os dois anos de dados e os dois produtos utilizados (UQRG e CODG), *gmGIM* apresentou as maiores porcentagens de ocorrência de melhor desempenho, enquanto *gmIonGrid* apresentou as maiores ocorrências de pior desempenho.

Vale ressaltar ainda o desempenho da metodologia que considera os fatores de assimetria provenientes de GIMs e do *ionGrid* (*gmIonGIM*), cujos resultados não apresentaram ocorrência entre os piores desempenho, considerando dados *in situ*, e apresentaram porcentagens significativamente baixas entre as ocorrências de pior desempenho, considerando dados de ionossondas. Isso pode ser indicativo de que o uso de dados de

informações do gradiente de densidade de elétrons proveniente de diferentes fontes pode ser uma alternativa para a recuperação de perfis provenientes de RO, especificamente em cenários desafiadores, como é o caso da região brasileira.

Por fim, ressalta-se ainda a complexidade envolvida nas avaliações de dados provenientes de RO uma vez que os dados comparados não apresentam a mesma geometria e ocorrência na mesma posição e tempo que os valores de referência. Além desses fatores, deve ser considerado ainda que mesmo os valores adotados como referência apresentam erros envolvidos em suas medições.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A RO parte do princípio de que o sinal transmitido pelo satélite GNSS sofre os efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera no trajeto até o receptor localizado no satélite LEO. A partir do sinal recebido é possível recuperar os índices de refração da atmosfera, possibilitando a obtenção de perfis atmosféricos, como os de densidade de elétrons. Entre os principais métodos, a inversa de Abel é comumente empregada, a partir da qual se assume que a atmosfera é simetricamente esférica. Isso pode acarretar diversos erros na recuperação dos perfis, em especial para perfis de densidade de elétrons em regiões com grande variação do gradiente eletrônico. Entre as principais abordagens utilizadas nas pesquisas mais recentes, existe a possibilidade da utilização da inversa de Abel auxiliada por informações ionosféricas de fontes suplementares. Apesar de ter apresentado resultados promissores, as principais limitações encontradas nesses trabalhos ocorreram quando foram consideradas regiões com maior variabilidade do gradiente da densidade de elétrons.

Na presente pesquisa primeiramente foi desenvolvido um extenso estudo em relação ao desempenho de mapas ionosféricos para a região brasileira. Foi proposto um método de avaliação de mapas globais por meio de dados de ionossondas. Com este estudo foi possível identificar, entre os produtos considerados, dois produtos globais com melhor desempenho para a região brasileira (UQRG e CODG). Além disso, a metodologia desenvolvida representou uma alternativa para a utilização dos dados de ionossondas, auxiliados por mapas globais, considerando a limitação no número de estações disponíveis em regiões como a do Brasil.

Na sequência foi avaliado o impacto do uso das incertezas dos valores de VTEC, disponibilizadas nos GIMs, nos métodos de interpolação e no posicionamento GNSS. Foram considerados quatro cenários: tempestade geomagnética, baixo fluxo solar e intenso fluxo solar (solstício e equinócio). Para a avaliação do método de interpolação utilizando as incertezas foi considerada uma abordagem global e duas regionais (faixas de latitudes e regiões específicas considerando os dois hemisférios). De modo geral, não foi possível observar impacto significativo no método de interpolação considerando os valores de incertezas do VTEC, apenas alguns padrões sensíveis de melhoria foram observados para regiões específicas, como a do Brasil. Na segunda parte do estudo foi avaliado o impacto do uso das incertezas no posicionamento GNSS, considerando dados de quatro estações na região brasileira. No posicionamento ficou evidente a influência do uso das incertezas, principalmente considerando as estações em região com ionosfera mais ativa (PPTE e SAVO) para os cenários de intenso fluxo solar.

A última contribuição desta pesquisa em relação aos mapas ionosféricos foi com uma avaliação comparativa do desempenho de mapas regionais e globais para a região brasileira. Para este estudo foram consideradas duas abordagens: uma utilizando dados de ionossondas como referência e outra com aplicação no posicionamento GNSS. Foi possível verificar novamente a consistência dos produtos globais, com desempenho semelhante na maior parte dos testes. Os produtos regionais do DGFI apresentaram os melhores resultados para as análises utilizando dados de ionossondas, enquanto o produto do INPE apresentou o pior desempenho. No estudo baseado no posicionamento, foi verificado um desempenho incompatível com o observado com as análises utilizando dados de ionossondas dos produtos do DGFI, principalmente para estações GNSS próximas às bordas dos mapas. Para solucionar esse problema foram desenvolvidos, e avaliados, os mapas híbridos, obtidos com os dados de produtos regionais e com demais valores provenientes de mapas globais com mesma resolução. O produto OTRG (híbrido dos produtos OTHG e OTHR) apresentou o melhor desempenho em três das quatro estações consideradas. O produto do INPE também apresentou o pior desempenho no posicionamento GNSS entre os produtos considerados.

Em relação aos estudos sobre RO, foi conduzida uma análise da disponibilidade de perfis ionosféricos provenientes de RO, bem como as ocorrências na região brasileira. Para isso, foram considerados dados de três missões, CHAMP, COSMIC e GRACE, sendo verificado que menos de 3% das ocultações dessas missões tiveram ocorrência na região do Brasil. Além disso, foi desenvolvida uma metodologia para a recuperação de perfis de densidade de elétrons utilizando dados de RO auxiliados por informações ionosféricas. A metodologia foi implementada no módulo *GMRION* do software CDAAC, utilizado para o processamento de dados de diversas missões de RO, incluindo a missão COSMIC. Foram propostas três abordagens para a inclusão do gradiente de densidade de elétrons (fator de assimetria) na recuperação dos perfis de densidades de elétrons: no somatório de densidades de elétrons, no valor de TEC e no valor final de densidade de elétrons estimado. Dentre essas abordagens, a primeira foi a que apresentou os melhores resultados e foi analisada em comparação com os produtos COSMIC, considerando como dados de referências medições *in situ* e provenientes de ionossondas. Além das três metodologias, foram avaliados três tipos de fatores de assimetria baseados nos valores provenientes: do *ionGrid*, dos GIMs e um terceiro, obtido por meio da média dos dois anteriores.

As análises levaram em consideração a abordagem com uso do fator de assimetria aplicado no somatório de densidades de elétrons. Considerando a avaliação com medições *in situ*, foram adotadas janelas de 20°, 10° e 5° (em latitude e longitude), de 50 e 100

km (em altitude) e de 2 e 4 horas (em tempo). De modo geral, o produto *gmGIM* apresentou melhor desempenho para o cenário de baixo fluxo ionosférico, enquanto o *ionPrf* obteve os piores resultados. Em relação aos dois cenários de intenso fluxo ionosférico o produto *ionPrf* apresentou os melhores resultados, enquanto *gmGIM* apresentou o pior desempenho.

As avaliações com dados de ionossondas foram aplicadas para dois anos de dados (2014 e 2015) e para os fatores de assimetria utilizando GIM foram utilizados os produtos CODG e UQRG. Janelas de 20°, 10° e 5° foram consideradas. De modo geral, para as janelas maiores (20°), o produto *ionPrf* apresentou os melhores resultados, porém, com as janelas mais restritas (10° e 5°), em geral o produto *gmGIM* apresentou melhor performance.

Foi possível verificar ainda que, apesar de não apresentar o melhor desempenho com frequência, o produto *gmLonGIM* não apresentou ocorrências de pior desempenho com a avaliação *in situ*. Considerando dados de ionossondas, o produto apresentou baixas taxas de ocorrência como pior desempenho. Sendo um indicativo de que o uso de mais de uma fonte de dados para representação da variabilidade horizontal da ionosfera pode ser uma possível alternativa para regiões com maior variabilidade da densidade de elétrons. Vale ressaltar ainda a complexidade das avaliações de dados provenientes de RO, devido às regiões de ocorrência e geometria envolvida. Nesse sentido, a metodologia proposta com o uso de dados de ionossondas auxiliados por mapas globais pode ser uma alternativa para a avaliação de informações ionosféricas.

Como recomendações para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação de mais produtos ionosféricos para a região brasileira, em especial os produtos regionais. Quanto ao método de avaliação de GIMs por meio de ionossondas recomenda-se a avaliação do desempenho do método para outras regiões, bem como a possibilidade de uma filtragem baseada na espessura equivalente da ionosfera, ou mesmo a inclusão deste termo nas equações de interpolação da f_oF_2 .

Em relação aos estudos de RO, recomenda-se realizar avaliações das metodologias para mais tipos de medições *in situ*, como das missões CHAMP e C/NOFS. Além disso, os métodos podem ser avaliados ainda para diferentes regiões, para épocas específicas e considerando dados simulados, como a partir de modelos ionosféricos (IRI, por exemplo). Na presente pesquisa foram considerados erros absolutos para evitar a atenuação dos mesmos com a análise das médias. Mais análises devem ser realizadas considerando-se as tendências observadas nos erros por região. Dependendo da disponibilidade de dados de referência, recomenda-se ainda a avaliação de períodos com maior quantidade de ocultações, anteriores a 2013, preferencialmente. Além disso, devem ser avaliadas as estratégias de configuração do

módulo GMRION e o impacto das configurações adotadas para os perfis obtidos em regiões específicas, como a região brasileira (JEREZ, 2021). Os estudos aqui desenvolvidos consideraram apenas dados da missão COSMIC. Dados de outras missões devem ser considerados futuramente, incluindo os da recente missão COSMIC-2.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, B.; TYLER, G. L. *Systematic errors in atmospheric profiles obtained from Abelian inversion of radio occultation data: Effects of large-scale horizontal gradients*. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D4, 3971-3992, 1999.
- ALTINAY, O.; TULUNAY, E.; TULUNAY, Y. *Forecasting of ionospheric critical frequency using neural networks*. **Geophysical Research Letters**, 24, 1467–1470, 1997.
- ALVES, D. B. M., SAPUCCI, L. F., MARQUES, H. A., DE SOUZA, E. M., GOUVEIA, T. A. F., MAGÁRIO, J. A. *Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil*. **GPS Solutions**, 20(4), 677-685, 2016.
- ANTHES, R. A.; BERNHARDT, P. A.; CHEN, Y.; CUCURULL, L.; DYMOND, K. F.; ECTOR, D.; HO, S.; HUNT, D.; KUO, Y.; LIU, H.; MANNING, K.; MCCORMICK, C.; MEEHAN, T. K.; RANDEL, W. J.; ROCKEN, C.; SCHREINER, W. S.; SOKOLOVSKIY, S. V.; SYNDERGAARD, S.; THOMPSON, D. C.; TRENBERTH, K. E.; WEE, T.; YEN, N. L.; ZENG, Z. *The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results*. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 89, n. 3, 313-334, 2008.
- ARAUJO-PRADERE, E.; WEATHERHEAD, E.; DANDENAULT, P.; BILITZA, D.; WILKINSON, P.; COKER, C.; AKMAEV, R.; BEIG, G.; BURESOVÁ, D.; PAXTON, L. *Critical issues in ionospheric data quality and implications for scientific studies*. **Radio Science**, 54, 440–454, 2019.
- AUSTEN, J. R.; FRANKE, S. J.; LIU, C. H. *Ionospheric imaging using computerized tomography*. **Radio Science**, v. 23, n. 3, 299-307, 1988.
- BEYERLE, G. *Simulating GPS radio occultation events*. Scientific Report 05-09, Danish Meteorological Institute, 2005.
- BORN, M.; WOLF, E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Elsevier, 1970. 808p.
- BRACEWELL, R. N. *The Fourier transform and its applications*. New York: McGraw-Hill, 1986. 373p.
- BRUNINI C.; AZPILICUETA, F.; GENDE, M.; ARAGÓN-ÁNGEL, A.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.M.; SANZ, J. *Toward a SIRGAS service for mapping the ionosphere's electron density distribution*, **Proceedings of the International Association of Geodesy Scientific Assembly 2009**, 2010.
- BUSINGER, S.; CHISWELL, S. R.; BEVIS, M.; DUAN, J.; ANTHES, R. A.; ROCKEN, C.; WARE, R. H.; EXNER, M.; VANHOVE, T.; SOLHEIM, F. S. *The promise of GPS in atmospheric monitoring*. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 1, 5-18, 1996.
- CANDER, L.R. *Spatial correlation of foF₂ and vTEC under quiet and disturbed ionospheric conditions: A case study*. **Acta Geophys.**, 55, 410–423, 2007.
- CDAAC. **General Documentation about CDAAC Data**. Disponível em: <<https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-offer/data-products-support/>>. Acesso em: ago. 2021.
- CDDIS. **NASA's Archive of Space Geodesy Data** Disponível em: <cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/atmospheric_products.html>. Acesso em Mai. 2020.

CHOU, M. Y.; LIN, C. C.; TSAI, H. F.; LIN, C. Y. *Ionospheric electron density inversion for Global Navigation Satellite Systems radio occultation using aided Abel inversions*. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 1, 1386-1399, 2017.

COSMIC. **COSMIC-2**. Disponível em: <<https://www.cosmic.ucar.edu/cosmic2/index.html>>. Acesso em: fev. 2021a.

COSMIC. **Data Products**. <<https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-offer/data-products-support/>>. Acesso em abr. 2021b.

CULVERWELL, I.; LEWIS, H.; OFFILER, D.; MARQUARDT, C.; BURROWS, C. *The radio occultation processing package, ROPP*. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, n. 4, 1887-1899, 2015.

DACH, R.; LUTZ, S.; WALSER, P.; FRIDEZ, P. **Bernese GNSS software version 5.2**. University of Bern, Bern Open Publishing, 2015.

DENARDINI, C. M.; DASSO, S.; GONZALEZ-ESPARZA, J. A. *Review on space weather in Latin America. 2. The research networks ready for space weather*. **Advances in Space Research**, 58(10), 1940-1959, 2016.

ELGERED, G., WICKERT, J. *Monitoring of the Neutral Atmosphere*. In: TEUNISSEN, P., MONTENBRUCK, O. (Eds). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, 2017. 1109-1138.

EMBRACE. **Space Weather Data Share** Disponível em:<<http://www2.inpe.br/climaespacial/SpaceWeatherDataShare/search/>>. Acesso em Mai. 2020.

EO PORTAL DIRECTORY. **FormoSat-7 / COSMIC-2 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)**. Disponível em: <<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-7>>. Acesso em: fev. 2019a.

EO PORTAL DIRECTORY. **GRACE-FO (Gravity Recovery And Climate Experiment - Follow-on)**. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/g/grace-fo>>. Acesso em: fev. 2019b.

EO PORTAL DIRECTORY. **Jason-1 Altimetry Mission**. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/j/jason-1>>. Acesso em: jun. 2021d.

EO PORTAL DIRECTORY. **MetOp-SG (MetOp-Second Generation Program)**. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/m/metop-sg>>. Acesso em: fev. 2019c.

EO PORTAL DIRECTORY. **TOPEX/Poseidon (Topography Experiment/Poseidon)**. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/topex-poseidon>>. Acesso em: jun. 2021e.

ERDOGAN, E.; SCHMIDT, M.; GOSS, A.; GÖRRES, B.; SEITZ, F. *Adaptive Modeling of the Global Ionosphere Vertical Total Electron Content*. **Remote Sensing**, v. 12, 1822, 2020.

ERDOGAN, E.; SCHMIDT, M.; SEITZ, F.; DURMAZ, M. *Near real-time estimation of ionosphere vertical total electron content from GNSS satellites using B-splines in a Kalman filter*. **Annales Geophysicae**, v. 35(2), 263-277, 2017.

ESA NAVIPEDIA. **NeQuick Ionospheric Model**. Disponível em: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NeQuick_Ionospheric_Model>. Acesso em: mar. 2019.

EUMETSAT. *Metop series*. Disponível em: <<https://www.eumetsat.int/our-satellites/metop-series?sjid=future>>. Acesso em: ago. 2021.

FELTENS, J. *Development of a new three-dimensional mathematical ionosphere model at European Space Agency/European Space Operations Centre*. **Space Weather**, v. 5(12):1–17, 2007.

FELTENS, J.; SCHAER, S. *IGS products for the ionosphere*. Tech. rep., European Space Operation Centre and Astronomical Institute of the University of Berne, 1998.

FENG, D. D.; HERMAN, B. M. *Remotely sensing the Earth's atmosphere using the Global Positioning System (GPS) - the GPS/MET data analysis*. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 16, n. 8, 989-1002, 1999.

FISHBACH, F. F. *A satellite method for temperature and pressure below 24 km*. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 9, 528-532, 1965.

FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V.R. *Atmosphere of Venus as studied with the Mariner 5 dual radio-frequency occultation experiment*. **Radio Science**, v. 4, n. 10, 879–897, 1969.

FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V.R. *The atmosphere of Mars analyzed by integral inversion of the Mariner IV occultation data*. **Planetary and Space Science**, v. 16, n. 8, 1035–1059, 1968.

FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V.R.; GARRIOTT, O. K.; SMITH, F. L. *The two-frequency bistatic Radar-Occultation method for study of planetary ionospheres*. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, n. 15, 3701–3710, 1965.

FJELDBO, G.; KLIÖRE, A.; ESHLEMAN, V.R. *The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V Radio Occultation Experiments*. **The Astronomical Journal**, v. 76, n. 2, 123–140, 1971.

GARCIA-FERNANDEZ, M. *Contributions to the 3D Ionospheric Sounding with GPS data*. (2004). (Tese de Doutorado) - Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha.

GARCIA-FERNANDEZ, M.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.M.; SANZ, J. *Performance of the improved Abel transform to estimate electron density profiles from GPS occultation data*. **GPS Solutions**, v. 9, 2005.

GARCIA-FERNANDEZ, M.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; JUAN, M.; SANZ, J. *Improvement of ionospheric electron density estimation with GPSMET occultations using Abel inversion and VTEC information*. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A9, 2003.

GERZEN, T.; JAKOWSKI, N.; WILKEN, V.; HOQUE, M. *Reconstruction of F2 layer peak electron density based on operational vertical total electron content maps*. **Annales Geophysicae**, v. 31, 1241–1249, 2013.

GHODDOUSI-FARD, R. *GPS ionospheric mapping at Natural Resources Canada*. In: **IGS workshop, Pasadena**, 2014.

GORBUNOV, M. E. *Canonical transform method for processing radio occultation data in the lower troposphere*. **Radio Science**, v. 37, n. 5, 2002.

GOSS, A.; SCHMIDT, M.; ERDOGAN, E.; GÖRRES, B.; SEITZ, F. *High-resolution vertical total electron content maps based on multi-scale b-spline representations*. **Annales Geophysicae**, v. 37, 699-717, 2019.

GOSS, A.; SCHMIDT, M.; ERDOGAN, E.; SEITZ, F. *Global and Regional High-Resolution VTEC Modelling Using a Two-Step B-Spline Approach*. **Remote Sensing**, v. 12, 1198, 2020.

GUNTER'S SPACE PAGE. **FORMOSAT-7/COSMIC-2**. Disponível em: <https://space.skyrocket.de/doc_sdat/formosat-7-cosmic-2.htm>. Acesso em: fev. 2019.

GUO, P.; WU, M.; XU, T.; JIN, H.; HU, X. *An Abel inversion method assisted by background model for GPS ionospheric radio occultation data*. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 123, 71-81, 2015.

HABARULEMA, J.B.; SSESSANGA, N. *Adapting a climatology model to improve estimation of ionosphere parameters and subsequent validation with radio occultation and ionosonde data*. **Space Weather**, 15, 84–98, 2016.

HAJJ, G. A.; ROMANS, L. J. *Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment*. **Radio Science**, v. 33, n. 1, 175-190, 1998.

HAJJ, G.; IBANEZ-MEIER, R.; KURSINSKI, E.; ROMANS, L. *Imaging the ionosphere with the Global Positioning System*. **International Journal of Imaging Systems and Technology**, v. 5, n. 2, 174-187, 1994.

HAJJ, G.A.; KURSINSKI, E.R.; ROMANS, L.J.; BERTIGER, W.I.; LEROY, S.S. *A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation*. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 4, 451-469, 2002.

HAUSCHILD, A. **Basic observation equations**. In: TEUNISSEN, P., MONTENBRUCK, O. (Eds). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer, 2017. 219-245.

HE, W.; HO, S. P.; CHEN, H.; ZHOU, X.; HUNT, D.; KUO, Y. H. *Assessment of radiosonde temperature measurements in the upper troposphere and lower stratosphere using COSMIC radio occultation data*. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 17, 2009.

HEALY, S. B.; THÉPAUT, J.-N. *Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements*. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, n. 615, 605-623, 2006.

HEALY, S. B.; WICKERT, J.; MICHALAK, G.; SCHMIDT, T.; BEYERLE, G. *Combined forecast impact of GRACE-A and CHAMP GPS radio occultation bending angle profiles*. **Atmospheric Science Letters**, v. 8, n. 2, 43-50, 2007.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.; SANZ, J. *Improving the Abel inversion by adding ground GPS data to LEO radio occultations in ionospheric sounding*. **Geophysical Research Letters**, 27, 2473–2476, 2000.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.; SANZ, J.; ORUS, R.; GARCIA-RIGO, A.; FELTENS, J.; KOMJATHY, A.; SCHAER, S.; KRANKOWSKI, A. *The IGS VTEC maps: A reliable source of ionospheric information since 1998*. **Journal of Geodesy**, 83, 263–275, 2009.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; ROMA-DOLLASE, D.; KRANKOWSKI, A.; GARCÍA-RIGO, A.; ORÚS-PÉREZ, R. *Methodology and consistency of slant and vertical assessments for ionospheric electron content models*. **Journal of Geodesy**, 91, 1405–1414, 2017.

HO, C.M.; WILSON, B.D.; MANNUCCI, A.J.; LINDQWISTER, U.J.; YUAN, D.N. *A comparative study of ionospheric total electron content measurements using global ionospheric maps of GPS, TOPEX radar, and the Bent model*. **Radio Science**, 32, 1499–1512, 1997.

HOCKE, K. *Inversion of GPS meteorology data*. In: *Annales Geophysicae*. Springer-Verlag, 1997. 443-450.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. New York: Springer-Verlag, 2008. 516p.

HOLZSCHUH, M. L. (2007). **Recuperação de perfis atmosféricos a partir de ocultação GPS: fundamentos, implementação e análise de resultados**. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, Brasil.

HSU, C.-T.; MATSUO, T.; LIU, J.-Y. *Impact of Assimilating the FORMOSAT-3/COSMIC and FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO Data on the Midlatitude and Low-Latitude Ionospheric Specification*. *Earth and Space Science*, 2018.

HU, A.; CARTER, B.; CURRIE, J.; NORMAN, R.; WU, S.; WANG, X.; ZHANG, K. *Modeling of topside ionospheric vertical scale height based on ionospheric radio occultation measurements*. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 124, 4926–4942, 2019.

HUNT, D.; ANTHES, R.; PEDATELLA, N.; SCHREINER, W.; SOKOLOVSKIY, S.; SYNDERGAARD, S.; WEE, T.; WEISS, J. *Cosmic Data Analysis and Archive System Software – History and Theory*. 2017. 43 slides.

IRI. *International Reference Ionosphere*. Disponível em: <<http://irimodel.org/>>. Acesso em: mar. 2019.

JAKOWSKI, N.; WEHRENPENNIG, A.; HEISE, S.; REIGBER, C.; LÜHR, H.; GRUNWALDT, L.; MEEHAN, T. K. *GPS radio occultation measurements of the ionosphere from CHAMP: Early results*. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 10, 2002.

JEREZ, G. O. **Novas estratégias de recuperação de perfis provenientes de rádio ocultação GNSS considerando a atmosfera brasileira**. (Projeto de Pós-Doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2021.

JEREZ, G.; PROL, F.; ALVES, D.; MONICO, J. *Analysis of the coverage of radio occultation electron density profiles over the Brazilian region*. In: **BBS 2019 Conference Book**. 2019.

JEREZ, G. O.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; PROL, F. S.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. *Performance of COSMIC electron density profiles over the Brazilian region by means of ionosonde data: ionPrf versus igaPrf*. In: *8th International Radio Occultation Working Group Meeting, Boulder. Poster Gallery*, 2021c.

JEREZ, G. O.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; PROL, F. S.; ALVES, D.; MONICO, J. F. *Assessment of Global Ionospheric Maps Performance by Means of Ionosonde Data*. *Remote Sensing*, v. 12(20), 3452, 2020a.

JEREZ, G. O.; SOUZA, A. L. C.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. *Assessment of global ionospheric maps considering TEC uncertainties*. In: *VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronômica e VIII Simpósio de Física e Astronomia do Vale do Paraíba*, 2021, São José dos Campos. **Abstract Book of VIII SBGEA & VIII SIMFAST**, 2021b.

JEREZ, G.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; PROL, F.; ALVES, D.; MONICO, J. *Assessment of global ionospheric maps performance in the Brazilian region using ionosonde data*. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**, 2021a.

JEREZ, G.; PROL, F.; ALVES, D.; MONICO, J.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M. *Assessment of electron density profiles over the Brazilian region using radio occultation data aided by global ionospheric maps*. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2020b.

KELLEY, Michael C. *The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics*. Academic press, 2009. 556p.

KILIFARSKA, N.A.; OUZOUNOV, D.P. *Theoretical modeling of foF2 and hmF2 ionospheric parameters during a strong magnetic disturbance*. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 106, 30415–30428, 2001.

KLIORE, A. J.; FJELDBO, G.; SEIDEL, B. L.; SWEETNAM, D. N.; SESPLAUKIS, T. T.; WOICESHYN, P. M.; RASOOL, S. I. *The atmosphere of Io from Pioneer 10 radio occultation measurements*. **Icarus**, v. 24, n. 4, 407-410, 1975.

KLIORE, A. J.; PATEL, I. R.; LINDAL, G. F.; SWEETNAM, D. N.; HOTZ, H. B.; WAITE JR, J. H.; MCDONOUGH, T. R. *Structure of the ionosphere and atmosphere of Saturn from Pioneer 11 Saturn radio occultation*. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 85, n. A11, 5857-5870, 1980.

KOURIS, S.S.; XENOS, T.D.; POLIMERIS, K.V.; STERGIIOU, D. *TEC and foF2 variations: Preliminary results*. **Annales Geophysicae**, 47, 2004.

KRANKOWSKI, A.; SHAGIMURATOV, I.I.; BARAN, L.W. *Mapping of foF2 over Europe based on GPS-derived TEC data*. **Advances in Space Research**, 39, 651–660, 2007.

KURSINSKI, E. R. *The GPS radio occultation concept: theoretical performance and initial results*. 1997. (Tese de Doutorado) – California Institute of Technology, Pasadena.

KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; BERTIGER, W. I.; LEROY, S. S.; MEEHAN, T. K.; ROMANS, L. J.; SCHOFIELD, J. T.; MCCLEESE, D. J.; MELBOURNE, W. G.; THORNTON, C. L.; Y; YUNCK, T. P. EYRE, J. R.; NAGATANI, R. N. *Initial results of radio occultation observations of Earth's atmosphere using the Global Positioning System*. **Science**, v. 271, n. 5252, 1107-1110, 1996.

KURSINSKI, E.; HAJJ, G.; SCHOFIELD, J.; LINFIELD, R.; HARDY, K. *Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System*. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D19, 23429-23465, 1997.

KURSINSKI, E.R.; HAJJ, G.A.; LEROY, S.S.; HERMAN, B. *The GPS Radio Occultation Technique*. In: LEE, L.C.; ROCKEN, C.; KURSINSKI, R. **Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate**. Hong Kong: Springer-Verlag, 2000.

LEI, J.; SYNDERGAARD, S.; BURNS, A. G.; SOLOMON, S. C.; WANG, W.; ZENG, Z.; LIN, C. H. *Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results*. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 112(A7), 2007.

LEITINGER, R.; CIRAULO, L.; KERSLEY, L.; KOURIS, S.S.; SPALLA, P. *Relations between electron content and peak density: Regular and extreme behaviour*. **Annales Geophysicae**, 47, 1093–1107, 2004.

LI, Z.; YUAN, Y.; WANG, N.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; HUO, X. *SHPTS: towards a new method for generating precise global ionospheric TEC map based on spherical harmonic and generalized trigonometric series functions*. **Journal of Geodesy**, v. 89(4), 331–345, 2015.

LIN, J.; SHEN, X., HU, L.; WANG, L.; ZHU, F. *CSES GNSS ionospheric inversion technique, validation and error analysis*. **Science China Technological Sciences**, v. 61, n. 5, 669-677, 2018.

LINDAL, G. F.; LYONS, J. R.; SWEETNAM, D. N.; ESHLEMAN, V. R.; HINSON, D. P.; TYLER, G. L. *The atmosphere of Uranus: Results of radio occultation measurements with Voyager 2*. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 92, n. A13, 14987-15001, 1987.

LINDAL, G. F.; SWEETNAM, D. N.; ESHLEMAN, V. R. *The atmosphere of Saturn-an analysis of the Voyager radio occultation measurements*. **The Astronomical Journal**, v. 90, 1136-1146, 1985.

LIU, A.; WANG, N.; LI, Z.; WANG, Z.; YUAN, H. *Assessment of NeQuick and IRI-2016 models during different geomagnetic activities in global scale: Comparison with GPS-TEC, dSTEC, Jason-TEC and GIM*. **Advances in Space Research**, 63, 3978–3992, 2019.

LIU, Q.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; LYU, H.; GOSS, A. *Influence of temporal resolution on the performance of global ionospheric maps*. **Journal of Geodesy**, 95(3), 1-16, 2021.

LUO, X.; XU, H.; LI, Z.; ZHANG, T.; GAO, J.; SHEN, Z.; YANG, C.; WU, Z. *Accuracy assessment of the global ionospheric model over the Southern Ocean based on dynamic observation*. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 154:127-131, 2017.

LUSIGNAN, B.; MODRELL, G.; MORRISON, A.; POMALAZA, J.; UNGAR, S. G. *Sensing the Earth's atmosphere with occultation satellites*. **Proceedings of the IEEE**, v. 57, n. 4, 458-467, 1969.

MANNUCCI, A. J.; AO, C. O.; YOUNG, L. E.; MEEHAN, T. K. *Studying the atmosphere using global navigation satellites*. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 95, n. 43, 389-391, 2014.

MANNUCCI, A.; WILSON, B.; YUAN, D.; HO, C.; LINDQWISTER, U.; RUNGE, T. *A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements*. **Radio Science**, 33(3), 565-582, 1998.

MANNUCCI, A.; WILSON, B.; YUAN, D.; HO, C.; LINDQWISTER, U.; RUNGE, T. *A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements*. **Radio Science**, 33(3), 565–582, 2008.

MARQUES, H. A.; MARQUES, H. A. S.; AQUINO, M.; VEETTIL, S. V.; MONICO, J. F. G. *Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric scintillation effects*. **Journal of Space Weather and Space Climate**, v. 8, A15, 2018.

MATHIAS, M. V. T. Bolsa PIBITI (2018-2019): **Análise de perfis atmosféricos obtidos a partir de dados de Rádio Ocultação GNSS para o território brasileiro**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2019.

McNAMARA, L. F. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MENZEL, D. H.; DE VAUCOULEURS, G. *Results from the Occultation of Regulus by Venus, July 7, 1959*. **The Astronomical Journal**, v. 65, 351, 1960.

MORAES, V. V. S. **Análise do comportamento de perfis atmosféricos a partir de dados de RO GNSS para a região brasileira**. (em desenvolvimento). 2021. (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

NASA. *Astronomy Picture of the Day*. 2006. Disponível em: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap060619.html>>. Acesso em: fev. 2019a.

NASA. *Mariner*. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/mariner>. Acesso em: fev. 2019c.

NASA. *NASA History: 45 Years Ago, Mariner 10 Off to Venus and Mercury*. 2018. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/45-years-ago-mariner-10-off-to-venus-and-mercury>>. Acesso em: fev. 2019b.

NASA/JPL. **GRACE-FO**. Disponível em: <<https://www.jpl.nasa.gov/images/gracefo/20180430/PIA22440-16.jpg>>. Acesso em: fev. 2019d.

NASA/JPL. **Space Images**. Disponível em: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/images/largesize/PIA04236_hires.jpg>. Acesso em: fev. 2019a.

NCAR & UCAR NEWS. *After 14 years, first COSMIC satellite mission come to an end*. Disponível em: <<https://news.ucar.edu/132736/after-14-years-first-cosmic-satellite-mission-comes-end>>. Acesso em: jun. 2020.

NESPOLO, R. S. Primeiro Ano Bolsa IC FAPESP (2020-2021): **Visualização e análise de perfis provenientes de rádio ocultação GNSS**. Início: 2020. Iniciação científica (Graduando em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2021.

NESPOLO, R. S. Segundo Ano Bolsa IC FAPESP (2021-2022): **Visualização e análise de perfis provenientes de rádio ocultação GNSS**. Início: 2020. Iniciação científica (Graduando em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2022.

NESPOLO, R. S.; ALVES, D. B. M.; JEREZ, G. O. Análise comparativa entre perfis ionosféricos de rádio ocultação das missões COSMIC e COSMIC-2. In: XXXII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, Presidente Prudente. **Anais do XXXII CIC**, 2020.

NIE, Y.; SHEN, Y.; CHEN, Q. *Combination Analysis of Future Polar-Type Gravity Mission and GRACE Follow-On*. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, 200, 2019.

NOAA. **COSMIC-2 Launch**. Disponível em: <<https://www.nesdis.noaa.gov/content/cosmic-2-launch>>. Acesso em: ago. 2021.

NUNES, L. Bolsa PIBIC (2021-2022): **Análise e visualização de perfis atmosféricos obtidos a partir de dados de rádio ocultação considerando diferentes missões**. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2022.

ODEYEMI, O.O.; ADENIYI, J.O.; OLADIPO, O.A.; OLAWAPO, A.O.; ADIMULA, I.A.; OYEYEMI, E.O. *Investigation on slab-thickness and B0 over an equatorial station in Africa and comparison with IRI model*. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 179, 293–306, 2018.

OKAY AHI, G.; JIN, S. *Hydrologic Mass Changes and Their Implications in Mediterranean-Climate Turkey from GRACE Measurements*. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, 120, 2019.

OPPA. **Office of Projects, Planning and Analysis: Metop-C**. Disponível em: <<https://www.nesdis.noaa.gov/OPPA/metopc.php>>. Acesso em: Mar. 2019.

ORÚS, R.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.; SANZ, J. *Improvement of global ionospheric vTEC maps by using kriging interpolation technique*. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 67(16), 1598-1609, 2005.

ORÚS-PÉREZ, R. O. *Ionospheric error contribution to GNSS single-frequency navigation at the 2014 solar maximum. Journal of Geodesy*, v. 91(4), 397-407, 2016.

PEDATELLA, N. M.; YUE, X.; SCHREINER, W. S. *An improved inversion for FORMOSAT-3/COSMIC ionosphere electron density profiles. Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 120, n. 10, 8942-8953, 2015.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. *Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. GPS Solutions*, v. 21, n. 3, 1013-1025, 2017.

PHINNEY, R. A.; ANDERSON, D. L. *On the radio occultation method for studying planetary atmospheres. Journal of Geophysical Research*, 73(5), 1819-1827, 1968.

PIETRELLA, M.; PERRONE, L. *A local ionospheric model for forecasting the critical frequency of the F2 layer during disturbed geomagnetic and ionospheric conditions. Annales Geophysicae*, 26, 323-334, 2008.

PIGNALBERI, A.; HABARULEMA, J.B.; PEZZOPANE, M.; RIZZI, R. *On the development of a method for updating an empirical climatological ionospheric model by means of assimilated vTEC measurements from a GNSS receiver network. Space Weather*, v. 17, 1131-1164, 2019.

PODAAC. **GRACE-FO**. Disponível em: <<https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE-FO>>. Acesso em: fev. 2019.

PROL, F. S. **IonMAP: Sistema de assimilação de dados para o imageamento tridimensional da ionosfera no Brasil**. 2019. (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

PROL, F. S.; CAMARGO, P. O. *Ionospheric tomography using GNSS: multiplicative algebraic reconstruction technique applied to the area of Brazil. GPS Solutions*, v. 20, n. 4, 807-814, 2016.

PROL, F. S.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; CAMARGO, P. D. O.; MUELLA, M. T. D. A. H. *Spatial and temporal features of the topside ionospheric electron density by a new model based on GPS radio occultation data. Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 123, n. 3, 2104-2115, 2018a.

PROL, F.; CAMARGO, P.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; MUELLA, M. *A new method for ionospheric tomography and its assessment by ionosonde electron density, GPS TEC, and single-frequency PPP. IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, 57, 2571-2582, 2018b.

RAM, S. T., SU, S., TSAI, L., LIU, C. H. *A self-contained GIM-aided Abel retrieval method to improve GNSS-Radio Occultation retrieved electron density profiles. GPS Solutions*, v. 20, n. 4, 825-836, 2016.

REVNIVYKH, S., BOLKUNOV, A., SERDYUKOV, A., MONTENBRUCK, O. GLONASS. In: TEUNISSEN, P., MONTENBRUCK, O. (Eds). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, 2017. 219-245.

ROM SAF. **GRM-16: ROPP Software Deliverable**. Disponível em: <<http://www.romsaf.org/ropp/>>. Acesso em Mar. 2019.

ROMA-DOLLASE, D.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; KRANKOWSKI, A.; KOTULAK, K.; GHODDOUSI-FARD, R.; YUAN, Y.; LI, Z.; ZHANG, H.; SHI, C.; WANG, C. *Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle. Journal of Geodesy* 92, 691-706, 2017.

ROVIRA-GARCIA, A.; IBÁÑEZ-SEGURA, D.; ORÚS-PÉREZ, R.; JUAN, J.M.; SANZ, J.; GONZALEZ-CASADO, G. *Assessing the quality of ionospheric models through GNSS positioning error: methodology and results. GPS Solutions*, 24(1), 1-12, 2020.

ROVIRA-GARCIA, A.; JUAN, J.; SANZ, J.; GONZÁLEZ-CASADO, G.; IBÁÑEZ, D. *Accuracy of ionospheric models used in GNSS and SBAS: methodology and analysis. Journal of Geodesy*, v. 90(3), 229-240, 2016.

SCHAER, S. *Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System*. 1999. (Tese de Doutorado) - University of Bern, Bern.

SCHAER, S.; GURTNER, W.; FELTENS, J. *The IONosphere Map EXchange format version 1. Tech. rep., Astronomical Institute of the University of Berne*, 1998.

SCHREINER, W. S.; WEISS, J. P.; ANTHES, R. A.; BRAUN, J.; CHU, V.; FONG, J.; ZENG, Z. *COSMIC-2 radio occultation constellation: First results. Geophysical Research Letters*, 47(4), 2020.

SCHREINER, W.; HUNT, D.; ROCKEN, C.; SOKOLOVSKIY, S. *Precise GPS data processing for the GPS/MET radio occultation mission at UCAR. In: PROCEEDINGS OF THE NATIONAL TECHNICAL MEETING-INSTITUTE OF NAVIGATION. INSTITUTE OF NAVIGATION*, 103-112, 1998.

SCHREINER, W.; ROCKEN, C.; SOKOLOVSKIY, S.; SYNDERGAARD, S.; HUNT, D. *Estimates of the precision of GPS radio occultations from the COSMIC/FORMOSAT-3 mission. Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 4, 2007.

SCHREINER, W.; SOKOLOVSKIY, S.; ROCKEN, C.; HUNT, D. *Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere. Radio Science*, v. 34, n. 4, 949-966, 1999.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SHAIKH, M. M.; NOTARPIETRO, R.; NAVA, B. *The impact of spherical symmetry assumption on radio occultation data inversion in the ionosphere: An assessment study. Advances in Space Research*, v. 53, n. 4, 599-608, 2014.

SHAO, Y.; GONZÁLEZ-CASADO, G.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; ROVIRA-GARCIA, A. *Improvement of the Ionospheric Radio Occultation Retrievals by Means of Accurate Global Ionospheric Maps. Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 123, n. 12, 10,331-10,344, 2018.

SILVA, B. P. Bolsa PIBIC (2019-2020): **Análise e visualização de perfis atmosféricos obtidos a partir de dados de rádio ocultação GNSS**. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2020.

SILVA, B. P. Bolsa PIBIC (2020-2021): **Análise da disponibilidade e avaliação de produtos atmosféricos obtidos a partir de dados de rádio ocultação para o território brasileiro**. Iniciação científica (Graduando em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2021.

SIRGAS. *SIRGAS ionospheric maps*. Disponível em: < <http://www.sirgas.org/en/iono-maps/>>. Acesso em: jun. 2021.

SPACE NEWS. **Final Beidou-3 satellite reaches operational orbit, China's launch sites gear up for July missions.** Disponível em: < <https://spacenews.com/final-beidou-3-satellite-reaches-operational-orbit-chinas-launch-sites-gear-up-for-july-missions/>>. Acesso em: jul. 2021.

SPALLA, P.; CIRAIOLO, L. *TEC and foF2 comparison.* **Annales Geophysicae**, 37, 929–938, 1994.

SSESSANGA, N.; MCKINNELL, L.A.; HABARULEMA, J.B. *Estimation of foF2 from GPS TEC over the South African region.* **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 112, 20–30, 2014.

STRAUS, P. R.; ANDERSON, P. C.; DANAHER, J. E. *GPS occultation sensor observations of ionospheric scintillation.* **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 8, 2003.

SYNDERGAARD, S. **Retrieval analysis and methodologies in atmospheric limb sounding using the GNSS radio occultation technique.** 1999. (Tese de Doutorado) – Danish Meteorological Institute, Copenhagen.

SYNDERGAARD, S.; KURSINSKI, E.; HERMAN, B.; LANE, E.; FLITTNER, D. *A refractive index mapping operator for assimilation of occultation data.* **Monthly weather review**, v. 133, n. 9, 2650–2668, 2005.

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; DENARDINI, C. M.; PÁDUA, M. B.; DE PAULA, E. R.; COSTA, S. M. A.; SANT'ANNA, N. *Ionospheric TEC weather map over South America.* **Space Weather**, v. 14(11), 937–949, 2016.

TEUNISSEN, P., MONTENBRUCK, O. (Eds). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems.** Springer, 2017. 1334p.

TITHERIDGE, J. *The slab thickness of the mid-latitude ionosphere.* **Planetary and Space Science**, 21, 1775–1793, 1973.

TOMASZEWSKI, D.; WIELGOSZ, P.; RAPINSKI, J.; KRYPIAK-GREGORCZYK, A.; KAZMIERCZAK, R.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; YANG, H.; ORÚS-PÉREZ, R. *Assessment of centre national d'etudes spatiales real-time ionosphere maps in instantaneous precise real-time kinematic positioning over medium and long baselines.* **Sensors**, v. 20(8), 2293, 2020.

TRICOMI, F. G. **Integral equations.** New York: Courier Corporation, 1985. 235p.

TSAI, L. C.; LIU, C. H.; HSIAO, T. Y.; HUANG, J. Y. *A near real-time phenomenological model of ionospheric electron density based on GPS radio occultation data.* **Radio Science**, v. 44, n. 05, 1–10, 2009.

TSAI, L. C.; TSAI, W. H. *Improvement of GPS/MET ionospheric profiling and validation using the Chung-Li ionosonde measurements and the IRI model.* **Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 15, 589–608, 2004.

TSAI, L.C.; CHENG, K.F.; LIU, C.H. *GPS radio occultation measurements on ionospheric electron density from low Earth orbit.* **Journal of Geodesy**, v. 85, n. 12, 941–948, 2011.

TSENG, T. P.; CHEN, S. Y.; CHEN, K. L.; HUANG, C. Y.; YEH, W. H. *Determination of near real-time GNSS satellite clocks for the FORMOSAT-7/COSMIC-2 satellite mission.* **GPS Solutions**, v. 22, n. 2, 47, 2018.

UNIDATA. **Network Common Data Form (NetCDF).** Disponível em: <<https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>>. Acesso em: abr. 2019.

- VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. *Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: the ISMR query tool*. **Computers & Geosciences**, v. 104, 125-134, 2017.
- WANG, C.; FAN, L.; WANG, Z.; SHI, C. *Assessment of global ionospheric maps over continental areas using precise point positioning technique*. **Journal of Spatial Science**, v. 65(1), 25-39, 2020a.
- WANG, D.; LUO, X.; WANG, J.; GAO, J.; ZHANG, T.; WU, Z.; YANG, C.; WU, Z. *Global ionospheric model accuracy analysis using shipborne kinematic GPS data in the arctic circle*. **Remote Sensing**, 11(17), 2062, 2019.
- WANG, H.; SUI, Y.; WANG, D.; FU, H.; FENG, S. *Undifference PPP method and performance assessment based on regional ionospheric model*. In: Sun J, Yang C, Xie J (eds) **China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings: Volume II**, Springer Singapore, Singapore, 684-695, 2020b.
- WANG, N.; LI, Z.; YUAN, Y.; LI, M.; HUO, X.; YUAN, C. *Ionospheric correction using GPS Klobuchar coefficients with an empirical night-time delay model*. **Advances in Space Research**, 63, 886-896, 2019.
- WICKERT, J.; REIGBER, C.; BEYERLE, G.; KÖNIG, R.; MARQUARDT, C.; SCHMIDT, T.; SCHMIDT, T.; GRUNWALDT, L.; GALAS, R.; MEEHLAN, T. K.; MELBOURNE, W. G.; HOCKE, K. *Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP*. **Geophysical research letters**, v. 28, n. 17, 3263-3266, 2001.
- WILLIS, N. J. **Bistatic radar**. Raleigh: SciTech Publishing, 2005. 271p.
- WU, X.; HU, X.; GONG, X.; ZHANG, X.; WANG, X. *Analysis of inversion errors of ionospheric radio occultation*. **GPS Solutions**, v. 13, n. 3, 231-239, 2009.
- YOUNG, H.; FREEDMAN, R. **Física IV: Ótica e física moderna**. São Paulo: PEARSON ADDISON Wesley, 2009. 420p.
- YUE, X.; SCHREINER, W. S.; KUO, Y. *A feasibility study of the radio occultation electron density retrieval aided by a global ionospheric data assimilation model*. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 117, n. A8, 2012.
- YUE, X.; SCHREINER, W. S.; KUO, Y. *Evaluating the effect of the global ionospheric map on aiding retrieval of radio occultation electron density profiles*. **GPS Solutions**, v. 17, n. 3, 327-335, 2013.
- YUE, X.; SCHREINER, W. S.; PEDATELLA, N.; ANTHES, R. A.; MANNUCCI, A. J.; STRAUS, P. R.; LIU, J. Y. *Space weather observations by GNSS radio occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2*. **Space Weather**, v. 12, n. 11, 616-621, 2014.
- YUE, X.; SCHREINER, W.; LEI, J.; SOKOLOVSKIY, S.; ROCKEN, C.; HUNT, D.; KUO, Y. *Error analysis of Abel retrieved electron density profiles from radio occultation measurements*. In: **Annales Geophysicae**. Copernicus GmbH, 217-222, 2010.
- ZENG, Z.; BURNS, A.; WANG, W.; LEI, J.; SOLOMON, S.; SYNDERGAARD, S.; QIAN, L.; KUO, Y. H. *Ionospheric annual asymmetry observed by the COSMIC radio occultation measurements and simulated by the TIEGCM*. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A7, 2008.
- ZHANG, H.; XU, P.; HAN, W.; GE, M.; SHI, C. *Eliminating negative VTEC in global ionosphere maps using inequality-constrained least squares*. **Advances in Space Research**, v.51(6), 988-1000, 2013.

ZHANG, L.; YAO, Y.; PENG, W.; SHAN, L.; HE, Y.; KONG, J. *Real-time global ionospheric map and its application in single-frequency positioning*. **Sensors**, v. 19(5), 1138, 2019.

ZHAO, J.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; LI, Z.; WANG, N.; YUAN, H. *Integrity investigation of global ionospheric TEC maps for high-precision positioning*. **Journal of Geodesy**, v. 95(3), 1, 2021.

APÊNDICE A – INVERSA DE ABEL

Niels Henrik Abel (1802-1829) foi um matemático norueguês com diversas contribuições para a matemática. Uma das mais importantes contribuições foi a solução para um formato de equação integral, cuja solução foi nomeada inversa de Abel. A transformada de Abel é dada por (BRACEWELL, 1986):

$$g(x) = 2 \int_x^\infty \frac{f(r)r}{\sqrt{r^2-x^2}} dr. \quad (\text{B.1})$$

A solução dessa equação é obtida com a inversa de Abel, dada por:

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{dg(x)}{dx} \frac{1}{\sqrt{x^2-r^2}} dx. \quad (\text{B.2})$$

Diversas deduções e aplicações da inversa de Abel podem ser obtidas em trabalhos como Phinney e Anderson (1968), Fjeldbo, Kliore e Eshleman (1971), Tricomi (1985) e Bracewell (1986).

APÊNDICE B – INFORMAÇÕES DAS MISSÕES DE RO

Quadro B.1 – Fontes de informação das principais missões de RO.

Missão	Origem instrumento RO	Informações
GPS/MET	NASA	https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/gps-met/
<i>Sunsat</i>	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/sunsat
<i>Oersted</i>	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/o/oersted
IOX	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/o/opal
CHAMP	NASA	https://eosps.nasa.gov/missions/challenging-mini-satellite-payload https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/champ
SAC-C	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/sac-c
SAC-D	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/sac-d https://podaac.jpl.nasa.gov/Aquarius
<i>Fesat</i>	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/f/fedsat
GRACE	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/g/grace https://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/
<i>Formosat-3/COSMIC</i>	UCAR/NSPO	https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/cosmic-1/ https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-3
FORMOSAT-7/COSMIC-2	UCAR/NSPO	https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/cosmic-2/ https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-7
<i>MetOp</i>	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/m/metop
C/NOFS	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cnofs
<i>TerraSAR-X</i>	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/terrasar-x
<i>TanDEM-X</i>	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-x
<i>Megha-Tropiques</i>	ISRO/CNES (<i>Indian Space Research Organisation / Centre National d'Études Spatiales</i>)	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/m/megha-tropiques
KOMPSAT-5	NASA	https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-5 https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/kompsat
<i>Feng Yun-3</i>	CMA/NSMC (<i>China Meteorological Administration/National Satellite Meteorological Center</i>)	https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/fy-3
CICERO	<i>GeoOptics</i>	https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cicero http://www.geooptics.com/

APÊNDICE C – PRODUTOS DISPONÍVEIS DA MISSÃO COSMIC

level10:

- *cosLv0*: Arquivo com dados brutos binários. Os dados são em formato 'BLACKJACK', desenvolvido pelo JPL;
- *leoTLE*: Dados de órbita em elemento de duas linhas.

level1a:

- *doleo0*: Arquivo utilizado para chamar o programa *leoOrb*, que calcula as órbitas dos satélites LEO.
- *goxBin*: Arquivo com dados brutos binários do receptor GPS GOX/IGOR;
- *goxSOH*: Arquivo de *log* e de mensagens de saúde do receptor GOX/IGOR;
- *igsOrb*: Arquivo de informações de órbita do GPS em formato SP3;
- *igsPol*: Arquivo de informações do movimento do pólo em formato IGS;
- *igsTrp*: Arquivo com informações do atraso zenital troposférico em formato SINEX;
- *ionObs*: Arquivo em formato RINEX 2.20, correspondentes aos arquivos *ionGps* em formato BINEX;
- *leoAtt*: Arquivo com informações de atitude e posição aproximada do satélites LEO;
- *lev1St*: Arquivo utilizado para armazenamento do estado de processamento entre os níveis 0 e 1 do *software*. Sempre que um arquivo *level0* é recebido, seu nome e tempo inicial e final são armazenados neste arquivo;
- *mulCal*: Arquivo de calibração com informações para reduzir o multicaminho na pseudodistância. Este arquivo é utilizado para detecção de perdas de ciclo e estimativa do TEC absoluto;
- *opnGps*: Arquivo com dados de ocultação em formato binário. Esses arquivos contêm dados em alta taxa recebidos pelos receptores instalados no satélite LEO;
- *podCrx*: Arquivo com dados GPS em baixa taxa em formato RINEX 2.20 compactados em formato *Hatanaka*. Esse arquivo substitui o arquivo *podGps*, em formato BINEX, e correspondem os arquivos *podObs*, em formato RINEX;
- *podGps*: Arquivo com dados LEO em baixa taxa para cálculo da órbita do satélite LEO. Este arquivo contém dados de todos os satélites GPS;
- *podObs*: Arquivo com dados GPS em baixa taxa em formato RINEX 2.20. Esse arquivo corresponde ao arquivo *podGps*, em formato BINEX.

level1b:

- *atmObj*: Arquivo de objeto da ocultação atmosférica, contém os nomes de arquivos necessários para o processamento da ocultação (excesso de fase e inversão);
- *atmPhs*: Arquivo de excesso de fase da atmosfera;
- *comClk*: Arquivo com os erros de relógio dos satélites GPS;
- *gpsBit*: Arquivo com *bits* de navegação, utilizado para processamento de dados *open loop* em camadas mais baixas da troposfera;
- *ionObj*: Arquivo de objeto da ocultação ionosférica, contém os nomes de arquivos necessários para o processamento da ocultação (excesso de fase e inversão);
- *ionPhs*: Arquivo de excesso de fase da ionosfera;
- *leoClk*: Arquivo com os erros de relógio dos receptores instalados nos satélites LEO;
- *leoDcb*: Arquivo com os DCBs (*Differential Code Biases*) dos receptores/antenas instalados no satélite LEO;
- *leoOrb*: Arquivo de informações da órbita do satélite LEO;
- *leoPod*: Arquivo de informações da órbita do satélite LEO em formato interno do *Bernese* (formato STD);

- *leoPor*: Arquivo de predições da órbita do satélite LEO, contendo predições de duas semanas em formato SP3;
- *occTab*: Arquivo contendo tabela de ocultações atmosféricas e ionosféricas;
- *pocTab*: Arquivo contendo tabela de ocultações previstas para um determinado dia em formato *netCDF*¹² (*Network Common Data Form*);
- *podTec*: Arquivo contendo TEC absoluto e dados auxiliares em formato *netCDF*;
- *scnLvl*: Arquivo contendo índices S4 de cintilação e dados auxiliares;
- *tipLvl*: Arquivo com medições georreferenciadas do fotômetro instalado no LEO (*Tiny Ionospheric Photometer*).

level2:

- *atmPrf*: Arquivo com perfis atmosféricos sem informações de umidade (pressão e temperatura hidrostáticas, refratividade, ângulo de refração, parâmetro de impacto, entre outros, em função da altitude em relação ao nível médio dos mares).
- *avnPrf*: Arquivo com perfis de temperatura, pressão e umidade obtidos com os arquivos de previsão NCEP AVN e incluídos nos perfis de ocultação. Esses arquivos são utilizados para o processamento em tempo real no CDAAC como informações *a priori* na estimativa de umidade em altitudes abaixo de 10 km e para comparações;
- *brfPrf*: Arquivo com perfis atmosféricos em formato BUFR modelagem climática. Contém informações dos arquivos *atmPhs*, *atmPrf* e *wetPrf*, incluindo ângulo de refração, refratividade, pressão, temperatura e umidade;
- *ecmPrf*: Arquivo com perfis de temperatura, pressão e umidade gerados por análises do ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*) e incluídos em perfis de ocultação. Esses arquivos são utilizados pelo sistema CDAAC em modo pós-processado como informações *a priori* na estimativa de umidade em altitudes abaixo de 10 km e para comparações;
- *eraPrf*: Arquivo com perfis de temperatura, pressão e umidade gerados por análises do modelo ERA-40 *Interim* e incluídos em perfis de ocultação;
- *gfsPrf*: Arquivo com perfis de temperatura, pressão e umidade gerados por análises operacionais do NCEP (GFS) e incluídos em perfis de ocultação. Esses arquivos são utilizados pelo sistema CDAAC em modo pós-processado para comparações;
- *igaPrf*: Arquivo com os perfis ionosféricos de uma ocultação em formato *netCDF*. Neste arquivo os perfis são obtidos a partir da inversa de Abel auxiliada por informações de gradiente horizontal de densidade de elétrons proveniente de valores mensais de NmF₂;
- *ionPrf*: Arquivo com os perfis ionosféricos de uma ocultação em formato *netCDF*;
- *ncpPrf*: Arquivo com perfis de temperatura, pressão e umidade gerados por análises do NCAR/NCEP e incluídos em perfis de ocultação. Esses arquivos são utilizados pelo sistema CDAAC em modo pós-processado para comparações;
- *sonPrf*: Arquivo com perfis de temperatura, pressão e umidade gerados a partir de radiossondas, utilizados para comparação;
- *wetPrf*: Arquivo com perfis de umidade inclusos.

level3:

- *mmcGrd*: Grid de dados médios de rádio ocultação ou MMC - *Monthly Mean Climatology* (Climatologia Média Mensal).

¹² *netCDF* é um conjunto de bibliotecas de acesso a dados científicos desenvolvido pela UCAR.
Fonte: UNIDATA (2019).

APÊNDICE D – FERRAMENTAS PARA RECUPERAÇÃO DE PERFIS DE RO

D.1 ROPP

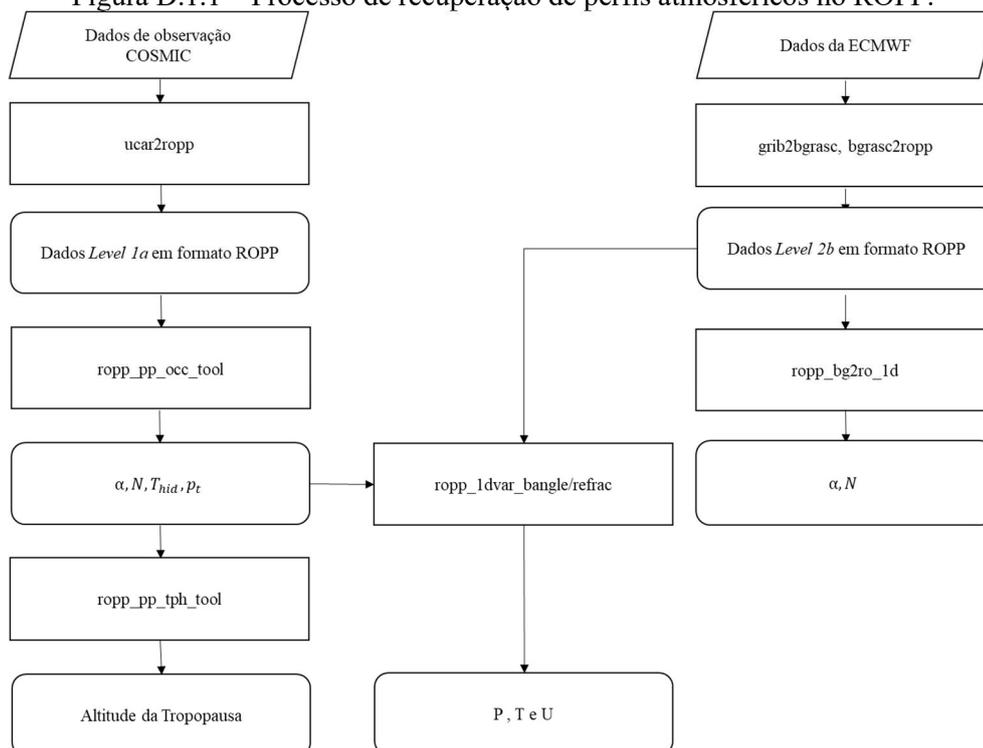
O ROPP foi desenvolvido pela *Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facility* (ROM SAF) da EUMETSAT para fornecer *softwares* em código fonte e *scripts* para o processamento de dados de rádio ocultação para a assimilação em modelos de NWP. Além dos arquivos de documentação dos diversos módulos do pacote de *softwares* disponível na página do sistema (ROM SAF, 2019), Culverwell et al. (2015) apresentam uma descrição completa do sistema e suas funcionalidades. Criado para a recuperação de perfis da atmosfera neutra, os processamentos realizam a eliminação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera por meio da combinação linear das observáveis de dupla frequência. A Figura D.1.1 sintetiza o processo de obtenção de perfis da atmosfera neutra com o ROPP. O programa suporta dados de entrada de diversas fontes, desde missões disponibilizadas pelo CDAAC, como a COSMIC, até de centros como o ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). A primeira etapa dos processamentos é a conversão dos dados para formato ROPP.

Seguindo a esquematização apresentada na Figura D.1.1, o módulo ‘ropp_pp_occ_tool’ realiza a leitura da fase e amplitude dos sinais em L_1 e L_2 , calcula os pontos tangentes (p_t) e ângulos de refração (α) e, a partir da inversa de Abel, estima perfis de refratividade (N), que permitem a obtenção de perfis da temperatura hidrostática (T_{hid}). Estes dados podem então ser aplicados ao módulo ‘ropp_pp_tph_tool’, assim como dados de outras fontes e modelos, para estimar a altitude da Tropopausa¹³. Os mesmos dados (α , N , T_{hid}) podem também ser utilizados com o auxílio de dados de modelos de NWP, como os provenientes do ECMWF, no módulo ‘ropp_1dvar_bangle/refrac’ que realiza o controle de qualidade e recuperação de perfis de pressão (P), temperatura (T) e umidade (U).

Os dados de NWP de fontes como o ECMWF podem ser ainda aplicados no módulo ‘ropp_bg2ro_1d’, que os utiliza em modelos de previsão (pressão, temperatura e umidade) para estimar perfis de refratividade e, a partir destes obter os ângulos de refração a partir da inversa de Abel.

¹³ Tropopausa é o limite entre a Troposfera e a Estratosfera.
Fonte: Kelley (2009).

Figura D.1.1 – Processo de recuperação de perfis atmosféricos no ROPP.



Fonte: Adaptado de Culverwell *et al.* (2015).

Conforme mencionado anteriormente, o ROPP foi desenvolvido para a recuperação de perfis da atmosfera neutra, sendo que os efeitos da ionosfera são calibrados ou eliminados por meio de combinações lineares das portadoras L_1 e L_2 . Portanto, essa ferramenta não foi utilizada no desenvolvimento da tese de doutorado.

A compilação do ROPP pode ser realizada em ambiente *Linux* ou *Windows 10*, para os testes realizados foi utilizado equipamento com sistema operacional *Linux*. Para a compilação é necessário um compilador para linguagem *FORTRAN 95*, neste caso foi utilizado o *gfortran*. A atual versão do ROPP é a 9.0, podendo ser obtidos módulos específicos ou a versão completa. Em todas as opções são disponibilizadas as documentações dos módulos.

Além desses pré-requisitos, antes da compilação do ROPP é necessária a instalação das bibliotecas *ZLIB*, *HDF5*, *netCDF-Core* e *netCDF-Fortran*. Para a compilação do módulo *ropp_io* é necessária a instalação das bibliotecas *MetDB BUFR* ou *ECMWF BUFR* e da ferramenta de leitura *GRIB*. O Quadro D.1 apresenta as versões das bibliotecas e da ferramenta utilizadas na versão 9.0 do ROPP.

Quadro D.1 – Versões das bibliotecas e ferramenta utilizadas no ROPP 9.0.

Biblioteca/tool	Versão
<i>ZLIB</i>	1.2.8
<i>HDF5</i>	1.8.16
<i>netCDF-Core</i>	4.4.0
<i>netCDF-Fortran</i>	4.4.3
<i>MetDB BUFR</i>	24.0.2
<i>ECMWF BUFR</i>	387
<i>GRIB</i>	1.14.5

Após a criação do diretório onde será instalado o pacote de processamentos, o diretório raiz deve ser definido (`export ROPP_ROOT=/usr/local`). Se as bibliotecas BUFR forem utilizadas, os diretórios também devem ser definidos (`export BUFR_LIBRARY=$HOME/ROPP/ropp-9-0/data/bufr/` e `export BUFR_TABLES=$HOME/ROPP/ropp-9-0/data/bufr/`). Para a compilação tanto das bibliotecas quanto dos módulos, o ROPP disponibiliza o *script buildpack*, que realiza a compilação e teste dos mesmos. Para a utilização do *script* basta utilizar o comando *buildpack*, seguido do nome da biblioteca, ferramenta ou módulo a ser compilado, e o compilador a ser utilizado.

Formato: `./buildpack library compiler`.

Exemplo: `./buildpack zlib gfortran`.

Na documentação do ROPP é destacada a importância de ser utilizado o mesmo compilador para todos os casos para evitar erros na instalação. A ordem de instalação das bibliotecas deve ser seguida devido à dependência de algumas. Portanto, a ordem de instalação deve ser *ZLIB*, *HDF5*, *netCDF-Core*, *netCDF-Fortran*, *MetDB BUFR* (opcional), *ECMWF BUFR* (opcional) e *GRIB* (opcional). Em seguida, a instalação dos módulos também pode ser realizada de maneira análoga utilizando o *script buildpack*.

Formato: `./buildpack package compiler`.

Exemplo: `./buildpack utils gfortran`.

Novamente a ordem de instalação é importante, sendo que o módulo *ropp_utils* deve ser o primeiro a ser instalado, seguido dos demais. A ordem utilizada foi *ropp_utils*, *ropp_io*, *ropp_pp*, *ropp_apps*, *ropp_fm* e *ropp_ldvar*. Com todos os módulos instalados existem diversas possibilidades de processamento dos dados. A utilização do programa se dá basicamente pela utilização da ferramenta selecionada seguida do nome do arquivo de entrada.

Formato: `./ropp_pp_occ_tool input_file`.

D.2 CDAAC

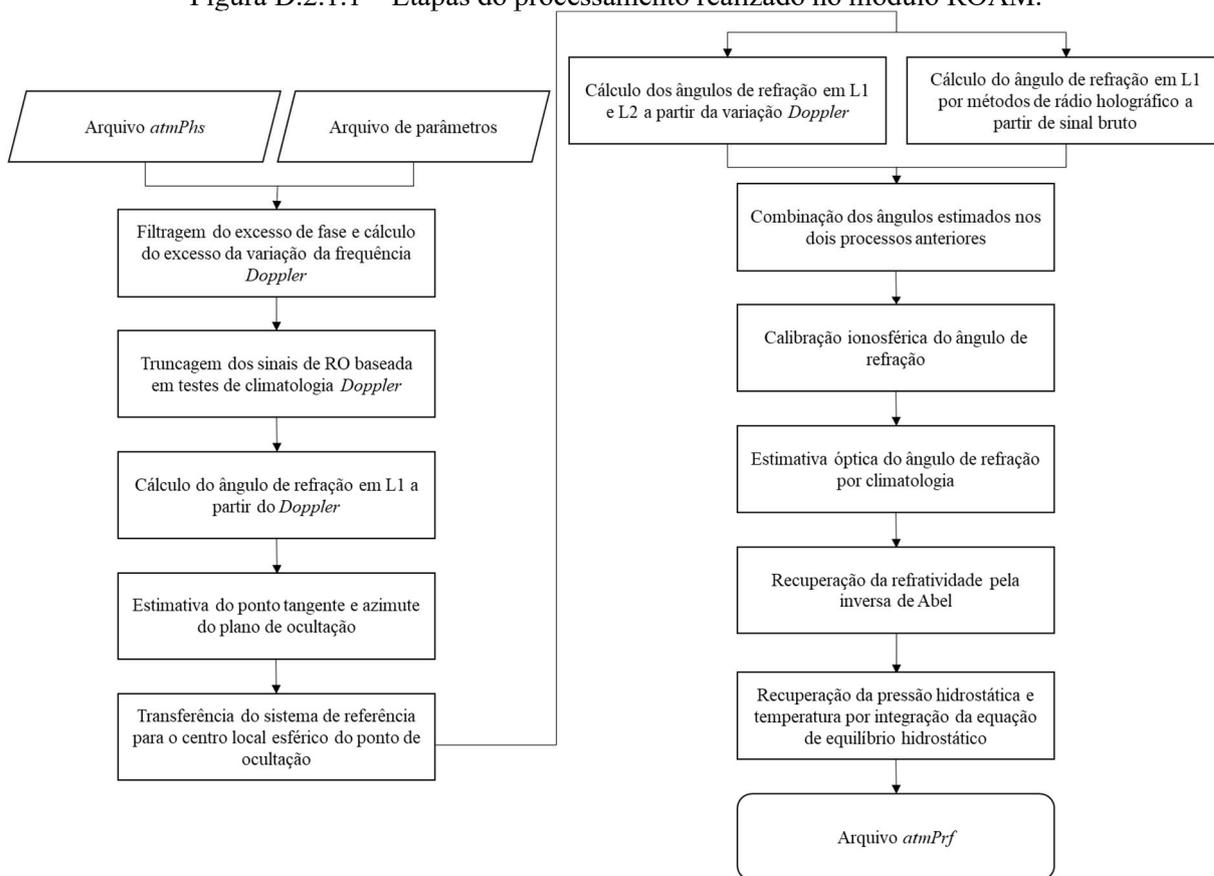
D.2.1 CDAAC: MÓDULO ROAM

Desenvolvido em *Fortran 77*, o código possui diversas sub-rotinas na mesma linguagem e em C, utilizadas em etapas específicas dos processamentos ou para transformações de referenciais. Todo o algoritmo foi desenvolvido assumindo simetria esférica local da refatividade na região em torno da ocultação (ponto tangente). A Figura D.2.1.1 apresenta o processo envolvido na recuperação de perfis da atmosfera neutra. O processo tem como dados de entrada os arquivos de excesso de fase da atmosfera neutra (*atmPhs*), dados *Level 1b* (Apêndice C), que apresentam informações de excesso de fase em ambas as portadoras (L_1 e L_2), tempo, posição e velocidade dos satélites LEO e GNSS. Outro dado de entrada é o arquivo com as configurações que são utilizadas no processamento (Arquivo *parms*).

Em linhas gerais, a recuperação tem início com a filtragem dos dados de excesso de fase e estimativa da variação *Doppler* da frequência para a estimativa dos ângulos de refração e dos parâmetros de impacto. Para isso, dois filtros podem ser utilizados, *Fourier* ou *Regressão por splines + Fourier*. A seleção do filtro é definida no arquivo de parâmetros (*parms*), bem como o tamanho da janela de filtragem. A truncagem dos sinais de rádio ocultação é feita a partir da diferença entre o excesso *Doppler* em L_1 e o *Doppler* estimado a partir das órbitas dos satélites e da refatividade de modelos climatológicos. A partir de um limiar definido é realizada a truncagem dos valores obtidos.

O cálculo do ângulo de refração é feito inicialmente em relação a um sistema de referência fixo ao centro da Terra para a estimativa do ponto de ocultação, ou seja, definição do raio tangente. Em seguida são estimados o ponto tangente e o azimute do plano de ocultação e feita uma transformação do sistema de referência. A partir disso são estimados os ângulos de curvatura em L_1 e L_2 e parâmetros de impacto a partir das variações *Doppler* das frequências. Esses valores são estimados sob a condição de propagação em um único caminho entre o emissor (GNSS) e o receptor (LEO), condição possível acima da troposfera úmida onde a ocorrência de multicaminho não é comum. O cálculo é realizado iterativamente conforme as Equações 5, 7 e 12, desenvolvidas na Seção 3.2.

Figura D.2.1.1 – Etapas do processamento realizado no módulo ROAM.



Sob condição de multicaminho, comum na troposfera úmida, os ângulos de refração em função dos parâmetros de impacto são derivados de dados brutos de fase e amplitude por métodos de rádio holográfico¹⁴. A versão atual inclui quatro métodos: *back propagation*; *sliding spectral*; *canonical transform*; e *Full Spectrum Inversion* (FSI). A determinação do método é selecionada nos parâmetros de entrada. O multicaminho na troposfera úmida resulta em fortes flutuações e erros nos sinais da L_2 . Aumento ou ocorrências abruptas de ruídos na L_2 Doppler ou valores elevados de desvios padrão entre L_1 e L_2 Doppler são utilizados como indicadores de multicaminho. Esses indicadores definem as altitudes abaixo das quais os ângulos de refração da L_1 derivados do Doppler devem ser substituídos pelos valores derivados de métodos de rádio holográfico. Abaixo dessas altitudes definidas não são utilizados dados da L_2 Doppler.

Após essa etapa é realizada a calibração ionosférica que utiliza a combinação linear dos ângulos de refração em função dos parâmetros de impacto obtidos a partir dos dados de L_1 e L_2 , conforme apresentado na Equação (16) da Seção 3.3. Para diminuir o efeito dos

¹⁴ Rádio holográficos são métodos de transformação canônica utilizados para processamento de dados de rádio ocultação em regiões da atmosfera com ocorrência de multicaminho. Fonte: Gorbunov (2002).

ruídos causados pela propagação dos sinais de altas para baixas altitudes, após a inversa de Abel, é realizada uma estimativa utilizando modelos climatológicos. O ângulo de refração obtido é uma combinação das observações e dos valores obtidos do modelo climatológico, com pesos variando de acordo com a altitude. O ângulo de refração otimizado obtido nesta etapa é então aplicado na inversa de Abel e, por fim, assumindo apenas a componente hidrostática, a pressão é estimada a partir da integração da equação de equilíbrio hidrostático e a temperatura é derivada da equação de estado dos gases ideais.

Para a compilação do módulo ROAM do software CDAAC são necessários: equipamento com sistema operacional *Linux*, compilador para linguagem *FORTRAN 90*, disponibilidade da biblioteca *netCDF* e compilador para linguagem *Perl*. O compilador utilizado pelo CDAAC é o *pgf90*, componente do pacote *PGI Compilers & Tools* (<https://www.pgroup.com/index.htm>), que possui compiladores de diversas linguagens. O código pode ser executado com outros compiladores como o *gfortran*, exigindo para isso algumas alterações no arquivo utilizado para a compilação (*Makefile*). A versão 4.01 da biblioteca *netCDF* foi utilizada, por ser a indicada nas versões dos módulos utilizados.

Após a verificação dos pré-requisitos a indicação do diretória da biblioteca '*libnetcdf.a*' deve ser atualizada no arquivo de '*Makefile*'. Além disso, deve ser criado o diretório '/ops/tools/parms/roam' onde devem ser inseridos os arquivos '*BENMOD*', '*CIRAI*', '*NCAR*' e '*jgm2.gh90.le*'. Outra opção é a alteração do código para indicar o diretório onde se encontram esses arquivos.

Com essas modificações realizadas o módulo pode ser compilado com o comando '*make*' a partir do terminal no diretório do módulo. Após compilado o programa é criado o executável '*roam*'. A execução do mesmo é realizada também pelo terminal com o comando '*./roam*', seguido do nome do arquivo de excesso de fase e do arquivo de parâmetros selecionado:

Formato: '*./roam atmPhs_name_nc parms_number*'.

Exemplo: '*./roam atmPhs_C001.2011.001.00.02.G14_2010.2640_nc parms40*'.

No módulo disponível do programa existem 47 opções de arquivos de configurações, incluindo configurações específicas para missões como GPS/MET e GRACE. Outra opção é inclusão de arquivos em formato *gpsBit* (Apêndice C), neste caso basta acrescentar o arquivo no diretório do executável '*roam*' e indicar o nome do arquivo no fim do comando:

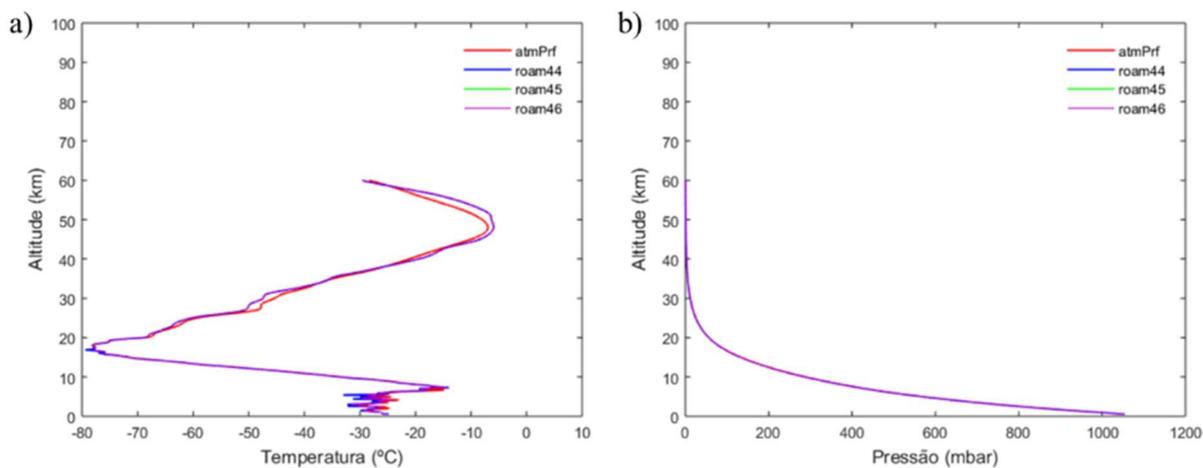
Formato: '*./roam atmPrf_name_nc parms_number gpsBit_name*'.

Exemplo: `./roam atmPhs_C001.2011.001.00.02.G14_2010.2640_nc parms40 gpsBit_C001.2011.001.00.02.G14_2010.2640_txt`.

O arquivo de saída é nomeado como `‘mega.nc’`, correspondente ao perfil atmosférico, compatível com o produto `atmPrf` (Apêndice C).

Para testar a versão instalada o módulo `ROAM` foi executado com o arquivo de excesso de fase disponível na pasta do mesmo. Para comparação foi utilizado o perfil disponibilizado para a mesma ocultação. Ressalta-se que os arquivos utilizados neste teste são os que já se encontravam disponíveis no diretório do `ROAM`. A comparação foi feita com o produto `atmPrf`, processado com outros parâmetros e em uma nova versão do módulo (`NEWROAM`), portanto, algumas diferenças eram esperadas e puderam ser verificadas nos perfis de temperatura. A visualização dos perfis de temperatura e pressão foram realizadas a partir da adaptação da ferramenta desenvolvida nessa pesquisa (Seção 5.3). A Figura E.1 apresenta os perfis de temperatura (a) e pressão (b) obtidos com o processamento do `ROAM` com os arquivos de parâmetros 44, 45 e 46, além dos perfis do produto `atmPrf`.

Figura D.2.1.2 – Perfis de temperatura e pressão processados com o ROAM e do produto `atmPrf`.



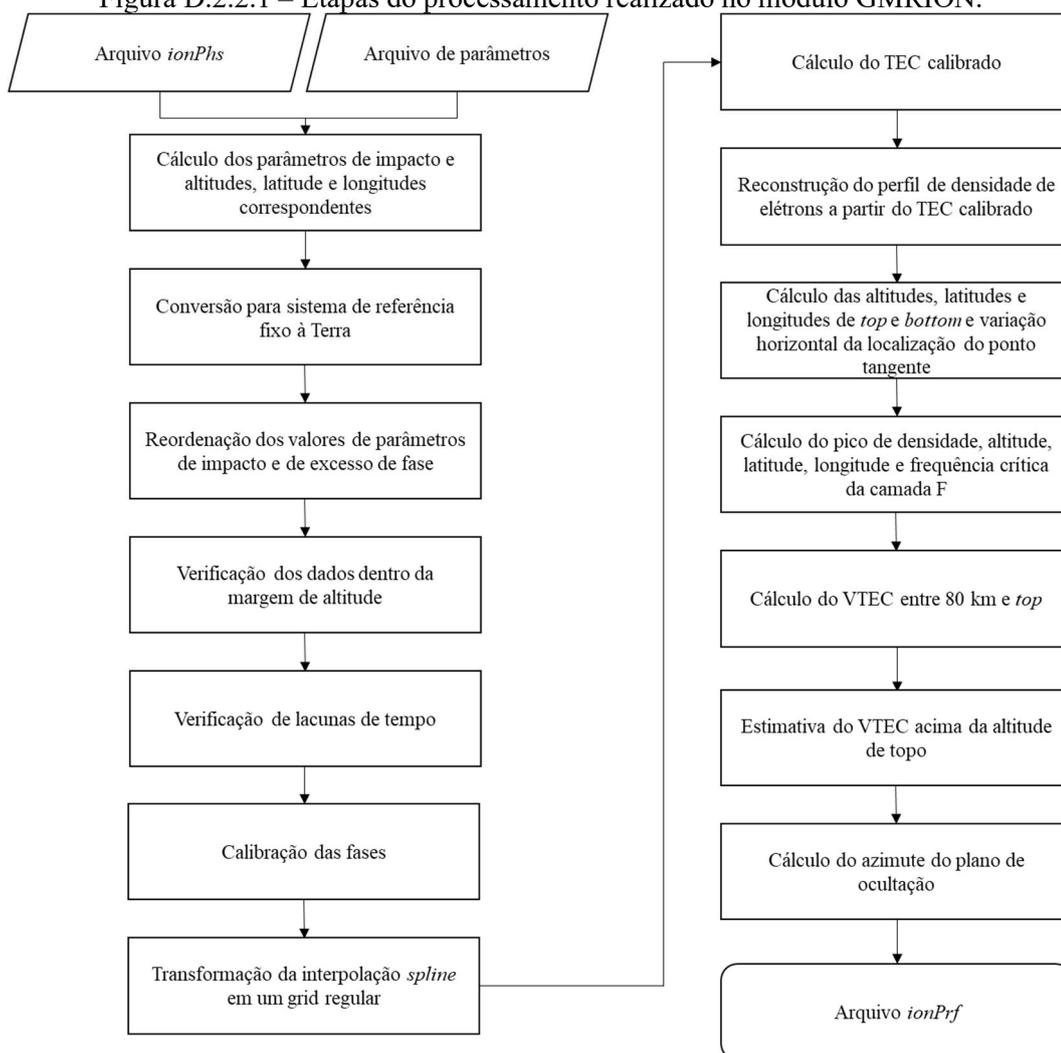
D.2.2 CDAAC: MÓDULO GMRION

Desenvolvido em *Fortran 77*, o código possui diversas sub-rotinas em linguagens como C e Pearl, também utilizadas em etapas específicas dos processamentos ou para transformações. A inversão utilizada é desenvolvida assumindo simetria esférica local da densidade de elétrons para uma grande área no entorno dos pontos tangentes. A documentação do módulo destaca o erro que isso pode causar principalmente nas camadas inferiores à região F da ionosfera. Sendo aconselhada a utilização dos perfis de densidade de elétrons como um mapeamento horizontal e vertical da ionosfera estruturado em um perfil unidimensional, considerando-se a geometria de uma ocultação específica, ao invés de considerar um perfil comum de densidade de elétrons.

A observação destacada na documentação do GMRION deve ser considerada na utilização e avaliação dos perfis obtidos por rádio ocultação, uma vez que o sinal transmitido tem um percurso diferente do que ocorre em outros instrumentos, como, por exemplo, as ionosondas, que possuem transmissor e receptor instalados em um mesmo sistema com emissão de sinais verticais.

A Figura D.2.2.1 apresenta a sequência de processos realizados na recuperação de perfis de densidade de elétrons do GMRION. A recuperação tem como dados de entrada os arquivos de excesso de fase da ionosfera (*ionPhs*), dados *Level 1b* (Apêndice C), que além das informações de excesso de fase em ambas as portadoras (L_1 e L_2) fornece também tempo, posição e velocidade dos satélites LEO e GNSS. É utilizado também como dado de entrada o arquivo com as configurações que serão utilizadas no processamento, selecionadas no arquivo de parâmetros (*parms*). No Quadro D.2.2.1 são apresentados os parâmetros disponíveis e as respectivas descrições.

Figura D.2.2.1 – Etapas do processamento realizado no módulo GMRION.



No início do processamento é feita uma aproximação, assumindo que o sinal transmitido pelo GNSS e recebido no LEO se propaga em linha reta, considerando que o ângulo de refração na ionosfera é pequeno. Assim, o primeiro parâmetro de impacto é calculado como a distância entre a reta conectando os satélites e o centro da Terra. Em seguida, a posição do ponto tangente é transformada de coordenadas cartesianas para latitude e longitude e um índice é determinado com uma *flag* para caracterizar a ocultação como ascendente ou descendente. Considerando que as órbitas dos satélites são dadas em um sistema inercial fixo ao centro da Terra, as coordenadas dos pontos tangentes são então transformadas para coordenadas geográficas considerando a rotação da Terra durante a ocultação. A partir do dia Juliano e do tempo universal da ocorrência da ocultação, as coordenadas são transformadas para o sistema de referência fixo à Terra.

Quadro D.2.2.1 – Parâmetros de configuração do GMRION.

Parâmetro	Descrição
<i>cvac</i>	Velocidade da luz no vácuo (km/s)
<i>fr1</i>	Frequência da portadora L_1 GPS (Hz)
<i>fr2</i>	Frequência da portadora L_2 GPS (Hz)
<i>icalib</i>	<i>Flag</i> para selecionar o modo de calibração: 1: Realiza a calibração com dados da seção auxiliar da ocultação; 0: Realiza a calibração com um modelo exponencial acima da órbita.
<i>iproctype</i>	<i>Flag</i> para selecionar o tipo de processamento: 0: Processa os dados com o TEC calibrado pela diferença de fase; 1: Processa os dados com o TEC calibrado pela diferença da fase pela pseudodistância na portadora L_1 ; 2: Processa os dados com o TEC obtido pela dupla diferença da fase na portadora L_1 .
<i>samprate</i>	Taxa de amostragem do receptor (segundos)
<i>gapmax</i>	Limite de tempo para lacunas
<i>toplim</i>	Limite superior para verificação de disponibilidade de dados, contado a partir da órbita do satélite LEO (km)
<i>botlim</i>	Limite inferior para verificação de disponibilidade de dados (km)

Em seguida, após a identificação do parâmetro de impacto máximo, os parâmetros de impacto e valores de fase são reordenados e separados entre os que possuem ângulo de elevação positivo (seção auxiliar) e negativo (seção da ocultação). Nesta etapa as posições dos satélites e pontos tangentes também são reordenadas, mas apenas os valores da seção da ocultação são armazenados. Apenas as ocultações com ponto tangente dentro da margem definida (*toplim* e *botlim*) são processadas. Se a calibração (*icalib*) é realizada utilizando dados da seção auxiliar é necessário que a margem de parâmetros de impacto inclua os valores da seção da ocultação. As lacunas de tempo estão associadas a perdas de ciclo, a verificação é realizada em todos os dados, tanto na seção de ocultação quanto na seção auxiliar. A identificação depende da taxa de amostragem dos dados, especificada nos arquivos de parâmetros (*samprate*).

A calibração da fase é feita de acordo com o modo selecionado no parâmetro *icalib*. No modo ‘1’ são utilizados os valores de fase interpolados da seção auxiliar, que são subtraídos dos dados de fase da seção da ocultação. Nesta opção é possível excluir os TEC entre o satélite GNSS e a altitude da órbita do satélite LEO, correspondente ao TEC calibrado, apresentado na seção 3.4.1. Quando os dados da seção auxiliar não estão disponíveis é possível utilizar o modo ‘0’, também chamado de “*quasi-calibration*”. Neste caso, a fase observada no maior parâmetro de impacto (altitude do ponto tangente próxima da altitude do LEO) é subtraída de todas as fases da amostra pertencente à seção da ocultação.

Em seguida, um *grid* regular de altitude com 300 níveis é definido para o qual as coordenadas das órbitas e dos pontos tangentes são interpoladas. O cálculo do TEC calibrado

é realizado por meio da diferença entre as fases calibradas das portadoras L_1 e L_2 , dado em TECU por:

$$TEC_{cal} = \frac{L_{1C} - L_{2C}}{40,3 \times 10^{16}} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2},$$

em que L_{1C} e L_{2C} correspondem às fases calibradas das duas portadoras. Este tipo de processamento corresponde ao tipo '0' do parâmetro *iproctype*, única opção disponível para este parâmetro atualmente. Para a calibração (*icalib*) modo '1', o TEC próximo da altitude da órbita do LEO pode ser dado aproximadamente por:

$$TEC_{(p_t)} \approx 2n_{e(p_{máx})} \sqrt{2p_{máx}(p_{máx} - p_t)},$$

com p_t sendo o parâmetro de impacto e $p_{máx}$ sendo o parâmetro de impacto máximo, o qual se assume ser igual ao raio da órbita do LEO. A equação anterior corresponde à solução apresentada por Lei *et al.* (2007) para a equação (44). A densidade de elétrons na altitude da órbita é estimada por regressão linear, utilizando o TEC calibrado de altitudes superiores às dos pontos tangentes. Para o modo '0' o TEC calibrado inicial é aproximadamente a metade do superior, assumindo que a densidade de elétrons tem distribuição simetricamente esférica e decai exponencialmente em altitudes acima da altitude de órbita. O TEC é interpolado em um *grid* e invertido em densidade de elétrons, com o método apresentado em Syndergaard *et al.* (2005).

Na sequência, as altitudes, latitudes e longitudes de topo (*top*) são convertidas em coordenadas cartesianas e é calculada a variação horizontal do ponto tangente. A densidade máxima de elétrons é então obtida a partir da busca entre os perfis acima de 150 km de altitude. A altitude, latitude e longitude correspondentes também são armazenadas. O VTEC é então calculado pela integral da densidade de elétrons entre as altitudes de 80 km e o topo, não sendo considerados valores negativos de densidade de elétrons. O VTEC acima da altitude de topo é estimado com a extrapolação usando regressão linear dos perfis de densidade de elétrons. E, por fim, os azimutes do plano da ocultação são calculados para os limites superior (*top*) e inferior (*bottom*) e pico de densidade de elétrons. O arquivo de saída do GMRION é o perfil ionosférico *ionPrf* (Apêndice C).

Para a compilação do módulo ROAM do *software* CDAAC são necessários: equipamento com sistema operacional *Linux*, compilador para linguagem *FORTRAN*, disponibilidade da biblioteca *netCDF* com suporte para linguagem C e *FORTRA77*. A versão *netCDF 4.01* foi utilizada, por ser compatível com a versão utilizada no desenvolvimento do código. Foram realizados testes com versões mais recentes da biblioteca, o que gerou problemas

na compilação dos códigos. Conforme mencionado no Apêndice D.2.1, o compilador utilizado pelo CDAAC é o *pgf90*. O módulo também pode ser executado com outros compiladores como o *gfortran*, neste caso exigindo alterações no arquivo *'Makefile'*, utilizado para a compilação.

Após a verificação dos pré-requisitos, a indicação do diretória das bibliotecas *'netcdf.inc'*, *'netcdf.h'* e *'libnetcdf.a'* deve ser atualizada no arquivo de *'Makefile'*. Após essas modificações o módulo pode ser compilado com o comando *'make'* executado no diretório do módulo a partir do terminal. Após compilado o programa é criado o executável *'gmrion'*. A execução do mesmo é realizada também pelo terminal com o comando *'./gmrion'*, seguido do nome do arquivo de excesso de fase e do arquivo de parâmetros selecionado:

Formato: *'./gmrion ionPhs_name_nc parms_number'*.

Exemplo: *'./gmrion ionPhs_C001.2012.030.00.03.G23_2010.2640_nc parms8'*.

No módulo disponível do programa existem 8 opções de arquivos de configurações, sendo que para o processamento dos perfis disponibilizados na página do CDAAC são utilizados os parâmetros do arquivo *'parms8'*. Todos os testes realizados para verificação dos perfis processados com a versão disponível do GMRION foram compatíveis com os perfis obtidos no CDAAC (*ionPrf*).

APÊNDICE E – RESULTADOS IN SITU

Tabela E.1 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 4 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	1,79	3,23	3,31	3,48
	Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	2,03	3,37	3,57	3,85
	Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	2,03	3,37	3,48	3,68
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	2,14	3,75	4,12	4,59
	Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	2,02	3,77	4,19	4,70
	Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	2,15	3,77	4,15	4,63
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	1,93	3,10	2,74	2,51	
Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	1,89	3,02	2,69	2,49	
Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	1,92	3,09	2,74	2,52	
Cenário 2	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	4,05	7,54	6,31	5,28
	Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	7,43	11,57	10,35	9,17
	Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	5,34	8,54	7,55	6,75
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	2,76	7,21	5,33	3,94
	Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	8,90	13,90	12,05	10,24
	Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	4,93	9,01	7,17	6,08
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	2,12	13,19	8,80	5,57	
Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	10,29	22,71	18,31	13,92	
Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	5,21	14,74	10,44	8,64	
Cenário 3	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	19,60	44,41	39,70	36,09
	Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	21,25	44,89	39,76	35,90
	Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	20,54	46,15	41,83	38,55
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	20,78	38,74	35,85	33,32
	Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	17,57	38,87	35,52	32,57
	Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	20,56	38,88	36,04	33,57
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10 ⁴ el/cm ³)	22,58	24,29	22,89	21,95	
Min tempo (10 ⁴ el/cm ³)	19,35	23,99	22,16	20,78	
Erro médio (10 ⁴ el/cm ³)	22,82	24,40	23,01	22,06	

Tabela E.2 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 2 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	2,20	5,03	4,86	4,85
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	3,11	5,53	5,64	5,85
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	2,66	5,25	5,21	5,28
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,76	3,82	4,20	4,70
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,42	3,67	4,12	4,71
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,77	3,91	4,32	4,84
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,70	3,30	2,90	2,66	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,68	3,15	2,80	2,61	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,73	3,33	2,95	2,71	
Cenário 2	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,57	7,68	7,55	7,43
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,52	7,57	7,44	7,32
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,57	7,39	7,26	7,14
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,53	7,71	7,58	7,46
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,47	7,79	7,66	7,54
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,52	7,60	7,48	7,35
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,51	7,69	7,57	7,44	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,50	7,89	7,76	7,64	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,51	7,67	7,55	7,42	
Cenário 3	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	13,78	40,15	32,76	25,64
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	23,55	46,04	39,42	33,51
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	19,10	38,82	31,73	25,36
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	10,43	58,46	48,26	38,07
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	23,90	71,92	61,73	51,53
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	13,52	57,53	47,33	37,14
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	10,56	58,21	48,30	38,38	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	18,38	66,03	56,12	46,20	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	12,97	60,43	50,51	40,60	

Tabela E.3 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 50 km em altitude e 4 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,60	3,13	3,16	3,30
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,86	3,28	3,47	3,73
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,87	3,30	3,39	3,56
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,75	3,42	3,74	4,17
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,61	3,49	3,87	4,37
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,77	3,46	3,81	4,28
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,53	2,78	2,38	2,13	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,45	2,66	2,29	2,10	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,54	2,78	2,40	2,17	
Cenário 2	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	3,70	7,60	6,37	5,32
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	6,73	11,07	9,85	8,69
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	5,08	8,57	7,60	6,80
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	2,87	6,86	5,23	4,28
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	7,70	12,43	10,86	9,33
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	4,82	8,73	7,16	6,22
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	2,57	12,77	8,64	6,46	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	9,62	21,89	17,76	13,63	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	5,33	14,84	10,94	9,21	
Cenário 3	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	17,53	40,78	35,63	31,74
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	18,97	42,80	37,04	32,53
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	18,05	43,18	38,63	35,24
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	19,54	35,33	32,07	29,18
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	13,76	37,71	33,93	30,15
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	18,72	35,76	32,72	29,96
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	22,35	19,19	17,40	16,16	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	17,36	20,80	18,01	15,71	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	22,42	19,40	17,68	16,43	

Tabela E.4 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 50 km em altitude e 2 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	2,01	5,15	4,90	4,85
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	2,97	5,59	5,72	5,92
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	2,54	5,41	5,33	5,37
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,34	3,30	3,66	4,15
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	0,93	3,20	3,62	4,24
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,38	3,41	3,83	4,38
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,24	2,93	2,48	2,17	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,17	2,77	2,31	2,09	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,27	2,97	2,54	2,27	
Cenário 2	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	0,86	7,67	7,54	7,41
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	0,81	7,57	7,44	7,30
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	0,91	7,39	7,25	7,12
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	0,80	7,72	7,59	7,46
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	0,78	7,80	7,67	7,54
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	0,81	7,62	7,49	7,35
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	0,74	7,74	7,60	7,47	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	0,77	7,94	7,80	7,67	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	0,74	7,72	7,58	7,45	
Cenário 3	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	8,57	15,97	11,20	7,67
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	19,49	10,13	9,03	10,11
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	12,63	12,69	9,37	7,69
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-	

Tabela E.5 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 4 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,79	3,11	3,17	3,31
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	2,03	3,28	3,44	3,68
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	2,03	3,26	3,36	3,53
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	2,14	3,70	4,04	4,46
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	2,02	3,73	4,11	4,57
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	2,15	3,71	4,07	4,51
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,93	3,03	2,68	2,45	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,89	2,96	2,64	2,43	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,92	3,02	2,68	2,46	
Cenário 2	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	4,05	6,97	5,99	5,30
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	7,43	10,87	10,01	9,20
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	5,34	8,13	7,36	6,80
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	2,76	6,37	4,81	3,95
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	8,90	13,02	11,51	10,25
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	4,93	8,19	6,70	6,08
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	2,12	11,39	7,95	5,67	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	10,29	20,91	17,46	14,02	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	5,21	12,94	9,78	8,74	
Cenário 3	Janela: 20° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	19,60	45,44	40,80	37,04
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	21,25	46,02	40,92	36,83
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	20,54	47,26	42,92	39,37
	Janela: 10° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	20,78	39,31	36,54	34,02
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	17,57	39,26	36,05	33,10
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	20,56	39,48	36,72	34,21
	Janela: 05° x 100 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	22,58	23,40	22,48	21,96	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	19,35	22,81	21,52	20,57	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	22,82	23,51	22,61	22,06	

Tabela E.6 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 100 km em altitude e 2 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	2,20	4,81	4,67	4,67
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	3,11	5,37	5,49	5,68
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	2,66	5,03	5,01	5,10
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,76	3,65	4,04	4,54
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,42	3,51	3,97	4,55
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,77	3,74	4,16	4,68
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,70	3,08	2,75	2,55	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,68	2,94	2,66	2,50	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,73	3,11	2,80	2,60	
Cenário 2	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,57	7,78	7,74	7,70
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,52	7,66	7,63	7,59
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,57	7,48	7,44	7,41
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,53	7,80	7,77	7,73
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,47	7,88	7,84	7,81
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,52	7,70	7,66	7,62
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,51	7,79	7,75	7,72	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,50	7,98	7,94	7,91	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,51	7,77	7,73	7,69	
Cenário 3	Janela: 20° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	13,78	37,93	31,92	26,02
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	23,55	44,21	38,71	33,69
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	19,10	36,76	30,95	25,63
	Janela: 10° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	10,43	54,78	46,28	37,79
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	23,90	68,24	59,75	51,25
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	13,52	53,85	45,35	36,86
	Janela: 05° x 100 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	10,56	54,32	45,99	37,66	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	18,38	62,14	53,81	45,48	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	12,97	56,54	48,21	39,88	

Tabela E.7 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 50 km em altitude e 4 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,60	3,00	3,01	3,11
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,86	3,19	3,34	3,54
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,87	3,18	3,25	3,39
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,75	3,36	3,64	4,02
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,61	3,44	3,77	4,21
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,77	3,39	3,70	4,12
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,53	2,70	2,31	2,04	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,45	2,59	2,22	2,01	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,54	2,70	2,32	2,09	
Cenário 2	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	3,70	7,04	6,08	5,37
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	6,73	10,42	9,56	8,76
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	5,08	8,17	7,44	6,87
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	2,87	6,16	4,88	4,32
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	7,70	11,75	10,51	9,35
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	4,82	8,04	6,89	6,26
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	2,57	10,94	7,76	6,53	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	9,62	20,06	16,88	13,70	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	5,33	13,01	10,45	9,27	
Cenário 3	Janela: 20° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	17,53	41,78	36,76	32,73
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	18,97	43,86	38,28	33,50
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	18,05	44,30	39,69	35,96
	Janela: 10° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	19,54	35,68	32,66	29,89
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	13,76	37,72	34,08	30,47
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	18,72	36,15	33,23	30,51
	Janela: 05° x 50 km x 4h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	22,35	18,12	16,99	16,31	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	17,36	19,11	17,09	15,40	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	22,42	18,36	17,26	16,58	

Tabela E.8 – Erros absolutos utilizando janelas de 20°, 10° e 5° em latitude e longitude, 50 km em altitude e 2 horas para os cenários 1, 2 e 3, considerando a distância mínima, menor diferença em tempo e valores médios.

Cenário 1	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	2,01	4,90	4,69	4,64
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	2,97	5,43	5,55	5,73
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	2,54	5,15	5,11	5,17
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	1,34	3,13	3,49	3,96
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	0,93	3,04	3,46	4,06
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,38	3,25	3,66	4,19
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	1,24	2,71	2,32	2,04	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	1,17	2,55	2,16	1,96	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	1,27	2,75	2,38	2,13	
Cenário 2	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	0,86	7,76	7,72	7,68
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	0,81	7,66	7,62	7,58
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	0,91	7,48	7,44	7,40
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	0,80	7,81	7,77	7,74
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	0,78	7,89	7,85	7,82
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	0,81	7,71	7,67	7,63
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	0,74	7,83	7,79	7,75	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	0,77	8,02	7,98	7,95	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	0,74	7,80	7,77	7,73	
Cenário 3	Janela: 20° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	19,49	9,87	9,42	9,88
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	12,63	11,33	9,39	8,14
	Janela: 10° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
	Min dist (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-
	Min tempo (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-
	Erro médio (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-
	Janela: 05° x 50 km x 2h				
	Referência	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGIM_{EDf}</i>	<i>gmIonGrid_{EDf}</i>
Min dist (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-	
Min tempo (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-	
Erro médio (10⁴ el/cm³)	-	-	-	-	

APÊNDICE F – RESULTADOS COM IONOSSONDAS

Tabela F.1 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2014, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{TEC}	gmIonGIM _{TEC}	gmIonGrid _{TEC}
BVJ03	808	869	foF ₂ (MHz)	1,30	2,54	2,18	2,04
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,27	7,32	5,97	5,37
			hmF ₂ (km)	35,32	37,48	35,87	36,20
SAA0K	851	636	foF ₂ (MHz)	0,95	2,19	1,87	1,65
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,11	5,71	4,64	3,87
			hmF ₂ (km)	39,70	43,38	42,63	43,47
FZA0M	836	1167	foF ₂ (MHz)	0,94	2,18	1,81	1,56
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,10	5,83	4,51	3,62
			hmF ₂ (km)	40,45	45,22	44,99	45,64
CAJ2M	769	134	foF ₂ (MHz)	1,06	2,86	2,26	1,91
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,67	8,09	6,33	5,09
			hmF ₂ (km)	37,77	38,80	38,66	38,20
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{TEC}	gmIonGIM _{TEC}	gmIonGrid _{TEC}
BVJ03	406	248	foF ₂ (MHz)	1,13	2,47	2,12	1,99
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,82	6,96	5,67	5,17
			hmF ₂ (km)	31,01	33,60	31,95	32,11
SAA0K	417	155	foF ₂ (MHz)	0,77	2,23	1,85	1,57
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,81	5,96	4,76	3,88
			hmF ₂ (km)	27,90	29,95	31,06	31,21
FZA0M	441	295	foF ₂ (MHz)	0,81	2,11	1,70	1,46
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,74	5,36	4,02	3,19
			hmF ₂ (km)	35,65	36,75	37,79	38,66
CAJ2M	364	37	foF ₂ (MHz)	0,93	2,67	2,08	1,73
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,23	6,73	5,12	3,98
			hmF ₂ (km)	34,08	35,82	36,15	34,14
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{TEC}	gmIonGIM _{TEC}	gmIonGrid _{TEC}
BVJ03	197	61	foF ₂ (MHz)	1,21	2,41	2,20	2,19
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,89	6,67	6,10	6,09
			hmF ₂ (km)	26,68	28,58	27,98	29,99
SAA0K	218	43	foF ₂ (MHz)	0,68	2,25	1,87	1,59
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	6,36	5,25	4,40
			hmF ₂ (km)	23,40	33,87	33,94	34,83
FZA0M	213	73	foF ₂ (MHz)	0,79	2,20	1,73	1,44
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,77	6,05	4,40	3,33
			hmF ₂ (km)	41,03	40,15	40,52	41,99
CAJ2M	221	15	foF ₂ (MHz)	1,28	1,96	1,64	1,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,90	3,67	3,26	3,44
			hmF ₂ (km)	42,44	44,84	45,33	42,08

Tabela F.2 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2015, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{TEC}	gmIonGIM _{TEC}	gmIonGrid _{TEC}
BVJ03	810	740	foF ₂ (MHz)	1,42	2,82	2,13	1,82
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,50	8,63	5,85	4,58
			hmF ₂ (km)	37,70	39,78	39,39	38,87
SAA0K	861	916	foF ₂ (MHz)	1,03	2,83	2,24	1,71
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,26	8,26	6,06	4,23
			hmF ₂ (km)	44,85	48,91	48,12	49,25
FZA0M	825	885	foF ₂ (MHz)	1,13	2,79	2,21	1,76
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,45	8,10	5,92	4,27
			hmF ₂ (km)	40,35	43,58	41,92	43,06
CAJ2M	773	1607	foF ₂ (MHz)	1,04	2,19	1,93	1,76
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,06	5,42	4,46	3,84
			hmF ₂ (km)	33,46	35,79	36,06	38,06
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{TEC}	gmIonGIM _{TEC}	gmIonGrid _{TEC}
BVJ03	428	214	foF ₂ (MHz)	1,17	2,84	2,01	1,57
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,88	8,72	5,44	3,76
			hmF ₂ (km)	29,32	31,52	31,03	30,80
SAA0K	443	220	foF ₂ (MHz)	0,93	2,60	2,04	1,55
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,02	7,45	5,36	3,61
			hmF ₂ (km)	43,79	49,89	49,53	50,81
FZA0M	419	236	foF ₂ (MHz)	0,87	2,74	2,06	1,48
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	8,15	5,61	3,57
			hmF ₂ (km)	38,93	38,36	37,42	39,75
CAJ2M	399	490	foF ₂ (MHz)	0,82	1,99	1,73	1,59
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,53	4,82	3,95	3,40
			hmF ₂ (km)	25,77	26,45	25,66	27,52
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{TEC}	gmIonGIM _{TEC}	gmIonGrid _{TEC}
BVJ03	204	55	foF ₂ (MHz)	1,27	2,52	1,95	1,68
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,06	6,85	4,78	3,76
			hmF ₂ (km)	32,31	33,97	33,55	33,81
SAA0K	229	42	foF ₂ (MHz)	0,85	2,70	2,05	1,51
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,95	8,05	5,69	3,78
			hmF ₂ (km)	46,12	58,38	57,92	74,06
FZA0M	203	62	foF ₂ (MHz)	0,70	3,12	2,32	1,60
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,48	9,85	6,71	4,04
			hmF ₂ (km)	30,32	31,09	31,02	31,30
CAJ2M	202	133	foF ₂ (MHz)	0,67	2,28	1,96	1,73
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,13	5,78	4,68	3,87
			hmF ₂ (km)	27,85	29,59	29,62	32,94

Tabela F.3 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2014, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
BVJ03	808	871	foF ₂ (MHz)	1,30	2,52	2,15	2,01
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,28	7,26	5,90	5,33
			hmF ₂ (km)	35,34	36,27	35,52	36,01
SAA0K	851	637	foF ₂ (MHz)	0,95	2,15	1,82	1,60
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,12	5,67	4,55	3,76
			hmF ₂ (km)	39,69	41,21	41,50	42,85
FZA0M	837	1170	foF ₂ (MHz)	0,95	2,19	1,79	1,54
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,12	5,99	4,55	3,59
			hmF ₂ (km)	40,42	44,11	44,17	45,20
CAJ2M	772	136	foF ₂ (MHz)	1,04	3,02	2,30	1,88
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,63	8,30	6,33	5,02
			hmF ₂ (km)	37,80	38,31	37,99	38,21
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
BVJ03	407	249	foF ₂ (MHz)	1,13	2,39	2,06	1,97
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,82	6,70	5,52	5,15
			hmF ₂ (km)	30,97	31,58	31,58	31,76
SAA0K	417	155	foF ₂ (MHz)	0,77	2,23	1,83	1,55
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,81	6,11	4,78	3,83
			hmF ₂ (km)	27,90	30,83	30,38	30,93
FZA0M	441	295	foF ₂ (MHz)	0,81	2,16	1,72	1,43
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,74	5,72	4,19	3,14
			hmF ₂ (km)	35,65	36,11	35,86	38,15
CAJ2M	364	37	foF ₂ (MHz)	0,93	2,81	2,09	1,73
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,23	6,76	5,00	3,98
			hmF ₂ (km)	34,08	35,36	35,69	34,14
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
BVJ03	197	61	foF ₂ (MHz)	1,21	2,43	2,20	2,19
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,89	6,62	6,02	6,09
			hmF ₂ (km)	26,68	27,21	27,98	29,99
SAA0K	218	43	foF ₂ (MHz)	0,68	2,42	1,96	1,57
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	7,17	5,60	4,33
			hmF ₂ (km)	23,40	32,44	32,96	34,38
FZA0M	213	73	foF ₂ (MHz)	0,79	2,39	1,86	1,45
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,77	6,64	4,78	3,37
			hmF ₂ (km)	41,03	39,90	40,38	42,17
CAJ2M	221	15	foF ₂ (MHz)	1,28	2,31	1,73	1,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,90	4,49	3,47	3,44
			hmF ₂ (km)	42,44	43,79	44,62	42,08

Tabela F.4 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2015, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
BVJ03	808	751	foF ₂ (MHz)	1,42	2,78	2,13	1,83
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,51	8,35	5,86	4,64
			hmF ₂ (km)	37,74	39,49	39,20	38,91
SAA0K	862	923	foF ₂ (MHz)	1,03	2,68	2,22	1,74
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,26	7,51	5,97	4,40
			hmF ₂ (km)	44,84	46,95	46,80	49,22
FZA0M	826	889	foF ₂ (MHz)	1,12	2,63	2,15	1,77
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,42	7,29	5,68	4,39
			hmF ₂ (km)	40,42	43,07	42,59	43,11
CAJ2M	773	1610	foF ₂ (MHz)	1,05	2,19	1,93	1,77
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,06	5,30	4,44	3,86
			hmF ₂ (km)	33,55	35,75	36,68	38,14
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
BVJ03	428	216	foF ₂ (MHz)	1,20	2,86	2,11	1,62
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,02	8,64	5,89	4,01
			hmF ₂ (km)	30,47	32,50	32,14	31,95
SAA0K	443	221	foF ₂ (MHz)	0,93	2,51	1,98	1,54
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,02	6,90	5,06	3,60
			hmF ₂ (km)	43,65	46,71	48,29	50,64
FZA0M	419	236	foF ₂ (MHz)	0,87	2,61	1,98	1,48
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	7,61	5,34	3,57
			hmF ₂ (km)	38,93	39,15	38,87	39,75
CAJ2M	398	492	foF ₂ (MHz)	0,82	2,04	1,75	1,59
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,55	4,86	3,94	3,40
			hmF ₂ (km)	26,14	26,89	26,38	27,88
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGIM_{TEC}</i>	<i>gmIonGrid_{TEC}</i>
BVJ03	205	56	foF ₂ (MHz)	1,42	2,68	2,17	1,91
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,59	7,70	5,74	4,74
			hmF ₂ (km)	36,82	37,47	38,04	38,30
SAA0K	229	42	foF ₂ (MHz)	0,85	2,48	1,92	1,51
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,95	6,97	5,12	3,78
			hmF ₂ (km)	46,12	47,83	57,44	74,06
FZA0M	203	62	foF ₂ (MHz)	0,70	2,85	2,16	1,60
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,48	8,55	6,06	4,04
			hmF ₂ (km)	30,32	31,01	30,90	31,30
CAJ2M	202	135	foF ₂ (MHz)	0,69	2,27	1,94	1,73
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,20	5,77	4,64	3,89
			hmF ₂ (km)	29,17	30,84	30,94	34,19

Tabela F.5 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2014, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	808	869	foF ₂ (MHz)	1,30	2,56	2,20	2,06
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,27	7,33	5,99	5,41
			hmF ₂ (km)	35,32	38,50	36,82	37,67
SAA0K	851	636	foF ₂ (MHz)	0,95	2,21	1,88	1,67
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,11	5,76	4,67	3,94
			hmF ₂ (km)	39,70	45,29	43,73	45,90
FZA0M	836	1167	foF ₂ (MHz)	0,94	2,21	1,83	1,58
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,10	5,90	4,55	3,66
			hmF ₂ (km)	40,45	48,41	46,91	47,23
CAJ2M	769	134	foF ₂ (MHz)	1,06	2,85	2,29	1,97
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,67	8,05	6,41	5,30
			hmF ₂ (km)	37,77	39,41	38,01	39,25
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	406	248	foF ₂ (MHz)	1,13	2,48	2,14	2,01
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,82	6,95	5,71	5,23
			hmF ₂ (km)	31,01	34,46	32,46	33,11
SAA0K	417	155	foF ₂ (MHz)	0,77	2,24	1,84	1,59
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,81	5,91	4,73	3,96
			hmF ₂ (km)	27,90	31,20	31,48	33,88
FZA0M	441	295	foF ₂ (MHz)	0,81	2,13	1,72	1,49
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,74	5,43	4,08	3,26
			hmF ₂ (km)	35,65	41,57	40,21	42,35
CAJ2M	364	37	foF ₂ (MHz)	0,93	2,65	2,10	1,75
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,23	6,66	5,12	4,04
			hmF ₂ (km)	34,08	38,42	35,16	34,50
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	197	61	foF ₂ (MHz)	1,21	2,43	2,24	2,25
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,89	6,70	6,20	6,27
			hmF ₂ (km)	26,68	28,94	28,06	29,86
SAA0K	218	43	foF ₂ (MHz)	0,68	2,22	1,86	1,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	6,20	5,21	4,55
			hmF ₂ (km)	23,40	36,25	36,42	37,16
FZA0M	213	73	foF ₂ (MHz)	0,79	2,22	1,75	1,48
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,77	6,08	4,46	3,45
			hmF ₂ (km)	41,03	44,74	49,14	55,03
CAJ2M	221	15	foF ₂ (MHz)	1,28	2,01	1,68	1,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,90	3,83	3,36	3,45
			hmF ₂ (km)	42,44	46,61	43,98	40,16

Tabela F.6 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2015, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	810	740	foF ₂ (MHz)	1,42	2,84	2,13	1,83
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,50	8,59	5,81	4,59
			hmF ₂ (km)	37,70	42,14	41,06	40,39
SAA0K	861	916	foF ₂ (MHz)	1,03	2,86	2,26	1,72
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,26	8,33	6,10	4,27
			hmF ₂ (km)	44,85	50,19	48,56	49,27
FZA0M	825	885	foF ₂ (MHz)	1,13	2,82	2,24	1,78
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,45	8,17	5,97	4,34
			hmF ₂ (km)	40,35	44,70	42,41	42,98
CAJ2M	773	1607	foF ₂ (MHz)	1,04	2,23	1,96	1,81
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,06	5,52	4,54	3,94
			hmF ₂ (km)	33,46	36,24	37,08	39,50
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	428	214	foF ₂ (MHz)	1,17	2,84	2,00	1,56
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,88	8,61	5,38	3,73
			hmF ₂ (km)	29,32	33,58	32,39	31,75
SAA0K	443	220	foF ₂ (MHz)	0,93	2,65	2,06	1,56
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,02	7,58	5,42	3,64
			hmF ₂ (km)	43,79	50,58	49,06	49,32
FZA0M	419	236	foF ₂ (MHz)	0,87	2,77	2,08	1,51
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	8,20	5,66	3,63
			hmF ₂ (km)	38,93	39,03	37,64	40,50
CAJ2M	399	490	foF ₂ (MHz)	0,82	2,04	1,78	1,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,53	4,98	4,07	3,52
			hmF ₂ (km)	25,77	26,65	26,66	28,56
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	204	55	foF ₂ (MHz)	1,27	2,51	1,94	1,67
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,06	6,73	4,72	3,72
			hmF ₂ (km)	32,31	34,66	34,07	33,87
SAA0K	229	42	foF ₂ (MHz)	0,85	2,75	2,06	1,52
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,95	8,09	5,69	3,82
			hmF ₂ (km)	46,12	57,90	60,04	63,20
FZA0M	204	62	foF ₂ (MHz)	0,70	3,17	2,36	1,65
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,48	9,97	6,81	4,21
			hmF ₂ (km)	30,32	32,62	32,87	32,57
CAJ2M	202	133	foF ₂ (MHz)	0,67	2,36	2,03	1,82
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,13	6,04	4,89	4,08
			hmF ₂ (km)	27,85	29,44	30,48	35,01

Tabela F.7 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2014, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	808	871	foF ₂ (MHz)	1,30	2,54	2,17	2,03
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,28	7,24	5,91	5,37
			hmF ₂ (km)	35,34	37,48	36,17	37,37
SAA0K	851	637	foF ₂ (MHz)	0,95	2,17	1,83	1,62
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,12	5,72	4,58	3,82
			hmF ₂ (km)	39,69	42,23	41,95	44,97
FZA0M	837	1170	foF ₂ (MHz)	0,95	2,22	1,81	1,56
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,12	6,06	4,60	3,63
			hmF ₂ (km)	40,42	46,93	45,63	46,47
CAJ2M	772	136	foF ₂ (MHz)	1,04	3,01	2,32	1,94
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,63	8,29	6,39	5,23
			hmF ₂ (km)	37,80	38,32	37,17	39,25
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	407	249	foF ₂ (MHz)	1,13	2,40	2,08	1,99
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,82	6,65	5,53	5,21
			hmF ₂ (km)	30,97	31,99	31,87	32,66
SAA0K	417	155	foF ₂ (MHz)	0,77	2,24	1,84	1,57
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,81	6,10	4,79	3,91
			hmF ₂ (km)	27,90	32,86	30,14	33,67
FZA0M	441	295	foF ₂ (MHz)	0,81	2,19	1,75	1,46
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,74	5,79	4,26	3,21
			hmF ₂ (km)	35,65	38,40	36,65	41,81
CAJ2M	364	37	foF ₂ (MHz)	0,93	2,77	2,10	1,75
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,23	6,66	4,98	4,04
			hmF ₂ (km)	34,08	35,80	33,71	34,50
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	197	61	foF ₂ (MHz)	1,21	2,42	2,23	2,25
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,89	6,51	6,06	6,27
			hmF ₂ (km)	26,68	27,63	27,40	29,86
SAA0K	218	43	foF ₂ (MHz)	0,68	2,41	1,96	1,62
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	7,14	5,63	4,48
			hmF ₂ (km)	23,40	34,27	34,17	36,71
FZA0M	213	73	foF ₂ (MHz)	0,79	2,43	1,90	1,49
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,77	6,75	4,89	3,49
			hmF ₂ (km)	41,03	39,59	42,26	55,19
CAJ2M	221	15	foF ₂ (MHz)	1,28	2,33	1,76	1,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,90	4,58	3,55	3,45
			hmF ₂ (km)	42,44	42,71	41,39	40,16

Tabela F.8 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2015, sendo Dist a distância média entre as ocultações e as ionossondas e Prf o número de perfis considerados.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	808	751	foF ₂ (MHz)	1,42	2,77	2,12	1,83
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,51	8,21	5,78	4,65
			hmF ₂ (km)	37,74	40,68	39,90	40,40
SAA0K	862	923	foF ₂ (MHz)	1,03	2,70	2,23	1,76
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,26	7,52	5,99	4,45
			hmF ₂ (km)	44,84	47,43	48,26	49,29
FZA0M	826	889	foF ₂ (MHz)	1,12	2,66	2,17	1,80
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,42	7,33	5,72	4,46
			hmF ₂ (km)	40,42	44,16	42,72	43,10
CAJ2M	773	1610	foF ₂ (MHz)	1,05	2,24	1,97	1,81
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,06	5,42	4,54	3,97
			hmF ₂ (km)	33,55	36,20	36,68	39,57
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	428	216	foF ₂ (MHz)	1,20	2,84	2,09	1,61
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,02	8,42	5,76	3,98
			hmF ₂ (km)	30,47	32,89	33,37	32,89
SAA0K	443	221	foF ₂ (MHz)	0,93	2,54	2,00	1,56
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,02	6,93	5,09	3,64
			hmF ₂ (km)	43,65	45,51	48,55	49,15
FZA0M	419	236	foF ₂ (MHz)	0,87	2,65	2,01	1,51
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,97	7,70	5,40	3,63
			hmF ₂ (km)	38,93	38,66	38,23	40,50
CAJ2M	398	492	foF ₂ (MHz)	0,82	2,10	1,80	1,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,55	5,04	4,08	3,53
			hmF ₂ (km)	26,14	27,68	27,95	28,92
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	ionPrf	gmGIM _{EDf}	gmIonGIM _{EDf}	gmIonGrid _{EDf}
BVJ03	205	56	foF ₂ (MHz)	1,42	2,67	2,16	1,90
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	3,59	7,51	5,64	4,70
			hmF ₂ (km)	36,82	38,15	38,93	38,36
SAA0K	229	42	foF ₂ (MHz)	0,85	2,52	1,94	1,52
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,95	6,98	5,15	3,82
			hmF ₂ (km)	46,12	47,41	59,16	63,20
FZA0M	203	62	foF ₂ (MHz)	0,70	2,90	2,20	1,65
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,48	8,65	6,16	4,21
			hmF ₂ (km)	30,32	30,85	32,41	32,57
CAJ2M	202	135	foF ₂ (MHz)	0,69	2,36	2,02	1,82
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,20	6,05	4,86	4,10
			hmF ₂ (km)	29,17	31,15	31,99	36,23

APÊNDICE G – RESULTADOS RELATIVOS COM IONOSSONDAS

Tabela G.1 – Erros relativos absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2014.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	808	869	foF ₂ (%)	14,48	14,88	15,23	15,88
			NmF ₂ (%)	32,34	32,98	33,59	34,86
			hmF ₂ (%)	10,37	10,43	10,37	10,56
SAA0K	851	636	foF ₂ (%)	13,85	14,49	14,30	14,69
			NmF ₂ (%)	35,02	36,10	35,53	36,32
			hmF ₂ (%)	11,15	11,32	11,27	11,27
FZA0M	836	1167	foF ₂ (%)	13,18	14,31	14,36	14,79
			NmF ₂ (%)	30,67	33,70	33,69	34,60
			hmF ₂ (%)	12,13	11,97	12,02	12,21
CAJ2M	770	134	foF ₂ (%)	10,97	11,05	10,95	11,28
			NmF ₂ (%)	22,76	22,81	22,72	23,52
			hmF ₂ (%)	11,81	11,73	11,80	11,94
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	406	248	foF ₂ (%)	12,44	11,88	12,69	14,19
			NmF ₂ (%)	25,56	24,52	26,01	29,00
			hmF ₂ (%)	9,35	9,36	9,30	9,53
SAA0K	417	155	foF ₂ (%)	9,25	8,78	9,04	9,87
			NmF ₂ (%)	18,64	17,57	18,09	19,78
			hmF ₂ (%)	7,80	8,12	8,26	8,27
FZA0M	441	295	foF ₂ (%)	11,81	12,05	12,63	13,64
			NmF ₂ (%)	27,88	29,32	30,30	32,20
			hmF ₂ (%)	10,73	10,32	10,23	10,49
CAJ2M	364	37	foF ₂ (%)	10,74	10,19	10,30	11,01
			NmF ₂ (%)	24,00	22,70	23,06	24,67
			hmF ₂ (%)	10,76	10,35	10,60	10,64
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	197	61	foF ₂ (%)	12,34	11,24	12,05	13,73
			NmF ₂ (%)	23,05	20,85	22,30	25,72
			hmF ₂ (%)	7,90	8,16	7,86	8,21
SAA0K	218	43	foF ₂ (%)	8,02	7,79	7,90	8,44
			NmF ₂ (%)	18,69	18,23	18,49	19,62
			hmF ₂ (%)	6,10	6,39	6,38	6,30
FZA0M	213	73	foF ₂ (%)	10,18	9,96	10,66	11,66
			NmF ₂ (%)	19,49	20,40	21,33	22,88
			hmF ₂ (%)	12,36	10,65	10,57	10,57
CAJ2M	221	15	foF ₂ (%)	16,66	14,66	15,69	16,84
			NmF ₂ (%)	40,33	35,69	38,02	40,68
			hmF ₂ (%)	14,03	13,83	14,15	13,92

Tabela G.2 – Erros relativos absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2015.

Janela: 20°							
Station	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	810	740	foF ₂ (%)	16,30	16,72	16,65	16,82
			NmF ₂ (%)	35,23	36,09	35,88	36,27
			hmF ₂ (%)	11,10	11,05	11,11	11,27
SAA0K	861	916	foF ₂ (%)	15,13	15,37	14,95	15,12
			NmF ₂ (%)	34,67	35,14	33,91	34,23
			hmF ₂ (%)	12,46	12,37	12,32	12,55
FZA0M	825	885	foF ₂ (%)	17,69	18,06	17,99	18,34
			NmF ₂ (%)	46,73	48,46	47,51	48,03
			hmF ₂ (%)	12,54	12,75	12,62	12,75
CAJ2M	773	1607	foF ₂ (%)	17,49	17,11	17,33	18,01
			NmF ₂ (%)	42,00	40,47	40,97	42,67
			hmF ₂ (%)	11,73	11,32	11,39	11,81
Janela: 10°							
Station	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	429	214	foF ₂ (%)	12,44	12,34	12,30	12,63
			NmF ₂ (%)	24,74	24,76	24,54	25,18
			hmF ₂ (%)	08,65	8,29	8,57	8,87
SAA0K	443	220	foF ₂ (%)	14,92	14,50	14,36	14,74
			NmF ₂ (%)	36,92	35,53	35,03	35,88
			hmF ₂ (%)	11,78	11,50	11,64	11,93
FZA0M	419	236	foF ₂ (%)	12,47	12,79	12,56	12,80
			NmF ₂ (%)	29,34	30,57	29,49	29,61
			hmF ₂ (%)	12,19	11,74	12,07	12,48
CAJ2M	399	490	foF ₂ (%)	13,47	12,49	13,00	13,92
			NmF ₂ (%)	29,73	27,12	28,12	30,19
			hmF ₂ (%)	09,15	08,70	08,67	09,17
Janela: 05°							
Station	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	204	55	foF ₂ (%)	13,32	13,04	12,85	13,09
			NmF ₂ (%)	26,24	26,01	25,18	25,35
			hmF ₂ (%)	09,59	09,55	09,78	10,10
FZA0M	203	62	foF ₂ (%)	10,35	09,85	10,31	11,30
			NmF ₂ (%)	23,79	22,82	23,65	25,55
			hmF ₂ (%)	09,68	09,49	09,52	09,33
SAA0K	229	42	foF ₂ (%)	10,41	08,85	09,44	10,35
			NmF ₂ (%)	20,77	17,19	18,42	20,59
			hmF ₂ (%)	12,21	11,45	10,66	10,28
CAJ2M	202	133	foF ₂ (%)	13,08	11,79	11,94	12,77
			NmF ₂ (%)	29,81	26,62	26,53	28,10
			hmF ₂ (%)	10,20	09,89	09,93	10,35

Tabela G.3 – Erros relativos absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2014.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	808	871	foF ₂ (%)	14,48	14,54	14,87	15,55
			NmF ₂ (%)	32,32	32,53	33,07	34,38
			hmF ₂ (%)	10,38	10,37	10,30	10,50
SAA0K	851	637	foF ₂ (%)	13,85	13,92	13,87	14,26
			NmF ₂ (%)	35,01	35,01	34,75	35,55
			hmF ₂ (%)	11,15	11,23	11,17	11,10
FZA0M	837	1170	foF ₂ (%)	13,21	13,55	13,56	13,92
			NmF ₂ (%)	30,75	31,24	31,10	31,78
			hmF ₂ (%)	12,12	11,94	11,84	12,08
CAJ2M	772	136	foF ₂ (%)	10,83	11,34	11,05	11,13
			NmF ₂ (%)	22,47	23,33	22,87	23,21
			hmF ₂ (%)	11,79	11,60	11,78	11,91
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	406	249	foF ₂ (%)	12,41	11,91	12,45	13,91
			NmF ₂ (%)	25,51	24,65	25,66	28,61
			hmF ₂ (%)	9,34	9,10	9,13	9,40
SAA0K	417	155	foF ₂ (%)	9,25	8,81	9,05	9,70
			NmF ₂ (%)	18,64	17,65	18,12	19,46
			hmF ₂ (%)	7,80	8,14	8,24	8,23
FZA0M	441	295	foF ₂ (%)	11,81	11,57	11,99	12,89
			NmF ₂ (%)	27,88	27,46	28,11	29,81
			hmF ₂ (%)	10,73	10,09	10,00	10,28
CAJ2M	364	37	foF ₂ (%)	10,74	10,06	10,27	11,01
			NmF ₂ (%)	24,00	22,57	23,08	24,67
			hmF ₂ (%)	10,76	10,38	10,62	10,64
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	197	61	foF ₂ (%)	12,34	11,63	12,24	13,73
			NmF ₂ (%)	23,05	21,49	22,62	25,72
			hmF ₂ (%)	7,90	7,87	7,73	8,21
SAA0K	218	43	foF ₂ (%)	8,02	7,58	7,78	8,22
			NmF ₂ (%)	18,69	17,72	18,21	19,15
			hmF ₂ (%)	6,10	6,21	6,09	6,19
FZA0M	213	73	foF ₂ (%)	10,18	10,05	10,58	11,20
			NmF ₂ (%)	19,49	19,27	20,12	21,19
			hmF ₂ (%)	12,36	10,62	10,53	10,59
CAJ2M	221	15	foF ₂ (%)	16,66	15,18	16,04	16,84
			NmF ₂ (%)	40,33	37,12	38,96	40,68
			hmF ₂ (%)	14,03	13,74	14,15	13,92

Tabela G.4 – Erros relativos absolutos médios por metodologia utilizando CODG com dados de 2015.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	809	751	foF ₂ (%)	16,13	16,21	16,32	16,65
			NmF ₂ (%)	34,73	34,95	35,09	35,78
			hmF ₂ (%)	11,07	10,81	11,04	11,23
SAA0K	862	923	foF ₂ (%)	15,07	15,25	14,92	15,07
			NmF ₂ (%)	34,53	34,96	33,90	34,11
			hmF ₂ (%)	12,44	12,44	12,43	12,54
FZA0M	825	889	foF ₂ (%)	17,23	17,66	17,58	17,87
			NmF ₂ (%)	44,23	46,24	45,24	45,51
			hmF ₂ (%)	12,55	12,83	12,75	12,76
CAJ2M	773	1610	foF ₂ (%)	17,48	17,11	17,33	18,00
			NmF ₂ (%)	41,98	40,22	40,82	42,64
			hmF ₂ (%)	11,76	11,22	11,48	11,84
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	428	216	foF ₂ (%)	12,86	12,79	12,73	13,06
			NmF ₂ (%)	26,15	26,02	25,89	26,58
			hmF ₂ (%)	8,94	8,41	8,87	9,16
SAA0K	443	221	foF ₂ (%)	14,87	14,70	14,43	14,70
			NmF ₂ (%)	36,81	36,41	35,40	35,78
			hmF ₂ (%)	11,74	11,44	11,80	11,89
FZA0M	419	236	foF ₂ (%)	12,47	12,56	12,44	12,80
			NmF ₂ (%)	29,34	30,25	29,34	29,61
			hmF ₂ (%)	12,19	12,09	12,35	12,48
CAJ2M	398	492	foF ₂ (%)	13,46	12,37	12,94	13,91
			NmF ₂ (%)	29,72	26,40	27,74	30,17
			hmF ₂ (%)	9,28	8,60	8,89	9,30
Janela: 05°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
BVJ03	204	55	foF ₂ (%)	15,02	15,13	14,64	14,80
			NmF ₂ (%)	31,77	32,19	30,83	30,92
			hmF ₂ (%)	10,77	10,67	10,94	11,27
SAA0K	229	42	foF ₂ (%)	10,41	9,38	9,82	10,35
			NmF ₂ (%)	20,77	18,39	19,31	20,59
			hmF ₂ (%)	12,21	11,05	10,68	10,28
FZA0M	203	62	foF ₂ (%)	10,35	9,75	10,36	11,30
			NmF ₂ (%)	23,79	23,09	23,99	25,55
			hmF ₂ (%)	9,68	9,69	9,41	9,33
CAJ2M	202	133	foF ₂ (%)	13,06	11,38	11,80	12,76
			NmF ₂ (%)	29,75	24,73	25,66	28,07
			hmF ₂ (%)	10,67	10,07	10,82	10,82

APÊNDICE H – AVALIAÇÃO CONSIDERANDO MAPAS HÍBRIDOS

Conforme mencionado anteriormente, os experimentos realizados com medições *in situ* e com ionossondas se concentraram na avaliação das metodologias utilizando mapas globais devido à qualidade desses produtos verificada no Capítulo 4 e também devido à disponibilidade dos produtos regionais e híbridos. Apenas para verificar o desempenho que os mapas híbridos do DGFI poderiam apresentar (produtos OTRG), foi realizado um breve experimento com os mapas avaliados na Seção 4.4. Como esperado, o número de ocultações para o período (246-252/2017) de disponibilidade de dados foi bem limitado (29 ocultações na região brasileira). A metodologia empregada foi análoga à apresentada na Seção 5.4. Os resultados com o produto UQRG são apresentados na Tabela H.1, enquanto os resultados com OTRG são apresentados na sequência na Tabela H.2. Foram utilizadas apenas janelas de 20° e 10° pois com a janela de 5° não foi obtida ocorrência de ocultações próximas aos dados de ionossondas. Para nenhuma das opções de janelas foi observada ocorrência de ocultações próximas à ionossonda BVJ03.

Tabela H.1 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando UQRG com dados de 2017.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
SAA0K	863	3	foF ₂ (MHz)	0,64	0,73	0,68	0,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	0,61	0,70	0,65	0,61
			hmF ₂ (km)	56,05	56,05	56,05	56,05
FZA0M	766	3	foF ₂ (MHz)	1,03	0,96	0,99	1,03
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,43	1,25	1,34	1,43
			hmF ₂ (km)	54,51	58,30	58,30	54,51
CAJ2M	902	9	foF ₂ (MHz)	0,42	0,55	0,46	0,42
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	0,58	0,75	0,65	0,58
			hmF ₂ (km)	66,81	67,14	66,81	66,81
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
SAA0K	543	1	foF ₂ (MHz)	0,54	0,72	0,63	0,54
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	0,46	0,62	0,54	0,46
			hmF ₂ (km)	27,79	27,79	27,79	27,79
FZA0M	534	1	foF ₂ (MHz)	1,25	0,97	1,12	1,25
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,88	2,27	2,59	2,88
			hmF ₂ (km)	35,84	43,42	43,42	35,84
CAJ2M	582	3	foF ₂ (MHz)	0,52	0,55	0,52	0,52
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	0,71	0,73	0,71	0,71
			hmF ₂ (km)	65,09	67,21	65,09	65,09

Tabela H.2 – Erros absolutos médios por metodologia utilizando OTRG com dados de 2017.

Janela: 20°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
SAA0K	863	3	foF ₂ (MHz)	0,64	0,66	0,65	0,64
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	0,61	0,64	0,63	0,61
			hmF ₂ (km)	56,05	56,05	56,05	56,05
FZA0M	766	3	foF ₂ (MHz)	1,03	0,96	0,99	1,03
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	1,43	1,28	1,36	1,43
			hmF ₂ (km)	54,51	51,69	54,51	54,51
CAJ2M	902	9	foF ₂ (MHz)	0,42	0,42	0,39	0,42
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	0,58	0,59	0,51	0,58
			hmF ₂ (km)	66,81	79,08	78,67	66,81
Janela: 10°							
Estação	Dist (km)	Prf	Medidas	<i>ionPrf</i>	<i>gmGIM</i>	<i>gmIonGIM</i>	<i>gmIonGrid</i>
SAA0K	543	1	foF ₂ (MHz)	0,54	0,51	0,53	0,54
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	0,46	0,43	0,45	0,46
			hmF ₂ (km)	27,79	27,79	27,79	27,79
FZA0M	534	1	foF ₂ (MHz)	1,25	1,06	1,16	1,25
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	2,88	2,46	2,68	2,88
			hmF ₂ (km)	35,84	30,19	35,84	35,84
CAJ2M	582	3	foF ₂ (MHz)	0,52	0,56	0,54	0,52
			NmF ₂ (10 ⁵ el/cm ³)	0,71	0,77	0,74	0,71
			hmF ₂ (km)	65,09	68,45	67,21	65,09

Conforme esperado, os resultados obtidos com esse experimento não são conclusivos, uma vez que um número muito limitado de perfis pôde ser avaliado. No entanto, alguns indicativos podem ser verificados. A limitação do número de ocultações do período considerado fica evidenciado com os resultados idênticos entre os produtos *ionPrf* e *gmIonGrid* (correspondente ao produto *igaPrf*). Quando os mapas *ionGrid* possuem ausência de dados para valores do *grid* utilizados no cálculo do fator de assimetria, o fator é considerado unitário, com isso *ionPrf* e *igaPrf* apresentam os mesmos resultados. Isso pôde ser observado em todos os casos deste experimento. Quanto ao desempenho dos produtos UQRG e OTRG, apesar da limitação dos resultados obtidos, é possível verificar melhor desempenho do produto híbrido OTRG, principalmente para a janela mais restrita (10°). Assim como observado nos experimentos anteriores, com a diminuição da janela de busca é possível verificar melhoria no desempenho obtido com o produto *gmGIM* tanto com o uso do UQRG quanto OTRG.

APÊNDICE I – TRABALHOS DESENVOLVIDOS

A seguir são apresentados os trabalhos publicados entre 2017 e 2021, derivados ou desenvolvidos em paralelo ao projeto de doutorado.

Artigos em periódicos:

Publicado:

- **JEREZ, G. O.**; HERNANDEZ-PAJARES, M.; PROL, F. S.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. *Assessment of global ionospheric maps performance by means of radiosonde data. Remote Sensing*, v.12(20), 2020.
- **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M. *Assessment of GPS/GLONASS point positioning in Brazilian regions with distinct ionospheric behavior. Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 26, n. 2, p.1-15, 2020.
- **JEREZ, G. O.**; VIEIRA, J. V. E.; ALVES, D. B. M. Análise do posicionamento por ponto preciso com dados GPS e GLONASS em diferentes latitudes. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 4, p.55-65, 2020.
- PEREIRA, V. A. S.; **JEREZ, G. O.**; CAMARGO, P. O. Programa computacional científico para a elaboração automática de listas de estrelas para astronomia de posição (LEDAP): revisão dos conceitos e exemplo de aplicação. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 8, n. 3, p.163-180, 2020.
- **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M. *Generation and performance analysis of GPS and GLONASS virtual data for positioning under ionospheric influence. Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 25, n. 2, p. 1-17, 2019.
- **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M; TACHIBANA, V. M. *Multivariate analysis of combined GPS/GLONASS point positioning performance in Brazilian regions under different ionospheric conditions. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 187, p.1-9, 2019.
- **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M. GLONASS: Revisão teórica e estado da arte. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 6, n. 2, p. 155-173, 2018.
- DA ROCHA, R. S. M.; **JEREZ, G. O.**; BRASSAROTE, G. D. O. N.; MONICO, J. F. G. Avaliação do efeito da cintilação ionosférica e de diferentes intervalos de tempo de coleta de dados no posicionamento por ponto preciso na sua forma on-line. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 5, n. 2, p. 251-276, 2017.

Submetido:

- **JEREZ, G. O.**; HERNANDEZ-PAJARES, M.; GOSS, A.; SILVA, C. M.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. *Impact and synergies of GIM error estimates on the VTEC interpolation and on the single-frequency PPP at low latitude region. GPS Solutions*, 2021.
- **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M. Análise do uso de dados GPS/GLONASS em diferentes métodos de posicionamento por satélites considerando a influência das condições ionosféricas brasileiras. *Revista Cartográfica*, 2021.
- SOUZA, A. L. C.; **JEREZ, G. O.**; CAMARGO, P. O.; ALVES, D. B. M. *Ionospheric GPS frequencies characterization and its impact on the positioning performance. Boletim de Ciências Geodésicas*, 2021.

Trabalhos completos em eventos:

Publicado:

- SOUZA, A. L. C.; **JEREZ, G. O.**; CAMARGO, P. O.; TACHIBANA, V. M. Análise multivariada aplicada ao estudo de irregularidade ionosférica para o território brasileiro. In: 14º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial, 2020, Florianópolis. **Anais do COBRAC 2020**, 2020.
- **JEREZ, G. O.**; PUGLIESI, E. A.; FLORES, E. F.; ALVES, D. B. M. Mapas ionosféricos para o território brasileiro utilizando krigagem ordinária. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2018, Recife. **Anais do VII SIMGEO**, 2018. p. 656-664.
- **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M. Monitoramento da atividade ionosférica utilizando índices de multicaminho. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2018, Recife. **Anais do VII SIMGEO**, 2018. p. 695-703.
- SOUZA, A. L. C.; **JEREZ, G. O.**; CAMARGO, P. O.; ALVES, D. B. M. Análise da relação entre índices e parâmetros ionosféricos provenientes de diferentes fontes. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2018, Recife. **Anais do VII SIMGEO**, 2018. p. 471-481.
- SANTOS, V. A.; SILVA, B. P.; **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M. Avaliação do uso combinado GPS/GLONASS no posicionamento por ponto considerando diferentes características ionosféricas. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2018, Recife. **Anais do VII SIMGEO**, 2018. p. 526-534.
- SIQUEIRA, L.; MONICO, J. F. G.; **JEREZ, G. O.**; FREIMAN, F. P. Espacialização dos valores de PDOP para região brasileira: comparação entre single e multi GNSS. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2018, Recife. **Anais do VII SIMGEO**, 2018. p. 570-579.
- **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M.; VIEIRA, J. V. E. Avaliação do posicionamento relativo GPS/GLONASS sob influência ionosférica. In: 13º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial, 2018, Florianópolis. **Anais do COBRAC 2018**, 2018.
- **JEREZ, G. O.**; PEREIRA, V. A. S.; ALVES, D. B. M. Relação entre índices de irregularidades e de cintilação ionosférica para a região brasileira. In: IV Simpósio Brasileiro de Geomática e II Jornadas Lusófonas sobre Ciência e Tecnologia da Informação Geográfica, 2017, Presidente Prudente. **Anais do IV SBG e II JL CTIG**, 2017. p. 589-596.
- SANTOS, V. A.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** Avaliação do posicionamento em diferentes regiões do país empregando dados virtuais GPS e GLONASS. In: IV Simpósio Brasileiro de Geomática e II Jornadas Lusófonas sobre Ciência e Tecnologia da Informação Geográfica, 2017, Presidente Prudente. **Anais do IV SBG e II JL CTIG**, 2017. p. 451-457.
- **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M.; PEREIRA, V. A. S.; SOUZA, A. L. C. Investigação da relação entre os índices de multicaminho dos sinais GNSS e os efeitos ionosféricos. In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva, 2017, Rio de Janeiro. **Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva**, 2017. p. 83-87.

Resumos em eventos:

Submetido:

- NESPOLO, R. S.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** *Visualização e Análise de Perfis de S4 Provenientes da Missão COSMIC. Simpósio SIRGAS 2021.*

Publicado:

- **JEREZ, G. O.**; HERNANDEZ-PAJARES, M.; PROL, F. S.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. *Performance of COSMIC electron density profiles over the Brazilian region by means of ionosonde*

data: ionPrf versus igaPrf. In: 8th International Radio Occultation Working Group Meeting, Boulder. Poster Gallery, 2021.

- NESPOLO, R. S.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** *Comparison among atmospheric profiles from COSMIC missions. In: 8th International Radio Occultation Working Group Meeting, Boulder. Poster Gallery, 2021.*

- **JEREZ, G. O.**; HERNANDEZ-PAJARES, M.; PROL, F. S.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. *Assessment of global ionospheric maps performance in the Brazilian region using ionosonde data. In: EGU General Assembly, 2021, Vienna. Proceedings of EGU General Assembly, 2021.*

- **JEREZ, G. O.**; SOUZA, A. L. C.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. *Assessment of global ionospheric maps considering TEC uncertainties. In: VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia e VIII Simpósio de Física e Astronomia do Vale do Paraíba, 2021, São José dos Campos. Abstract Book of VIII SBGEA & VIII SIMFAST, 2021.*

- ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.**; SETTI JUNIOR, P. T. *Analysis of multipath index time series using data from Brazilian GNSS stations under different ionospheric conditions. In: VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia e VIII Simpósio de Física e Astronomia do Vale do Paraíba, 2021, São José dos Campos. Abstract Book of VIII SBGEA & VIII SIMFAST, 2021.*

- MORAES, V. V. S.; **JEREZ, G. O.**; ALVES, D. B. M. *Análise da disponibilidade e distribuição de perfis atmosféricos de missões de rádio ocultação para a região da América do Sul. In: VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia e VIII Simpósio de Física e Astronomia do Vale do Paraíba, 2021, São José dos Campos. Abstract Book of VIII SBGEA & VIII SIMFAST, 2021.*

- **JEREZ, G. O.**; PROL, F. S.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; HERNANDEZ-PAJARES, M. *Assessment of electron density profiles over the Brazilian region using radio occultation data aided by global ionospheric maps. In: EGU General Assembly, 2020, Vienna. Proceedings of EGU General Assembly, 2020.*

- VIEIRA, J. V. E.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.**; SILVA, C. M. *Análise da integração de dados GPS e GLONASS no posicionamento relativo. In: XI Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2020, Curitiba. Anais do XI Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2020;*

- ALBUQUERQUE, A. M.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** *Análise da variação do conteúdo total de elétrons em relação à região e período de ocorrência. In: XXXII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2020, Presidente Prudente. Anais do XXXII CIC, 2020;*

- NESPOLO, R. S.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** *Análise comparativa entre perfis ionosféricos de rádio ocultação das missões COSMIC e COSMIC-2. In: XXXII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2020, Presidente Prudente. Anais do XXXII CIC, 2020;*

- SILVA, B. P.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** *Análise dos perfis de pressão de vapor d'água em diferentes regiões do globo terrestre por meio da técnica de rádio ocultação. In: XXXII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2020, Presidente Prudente. Anais do XXXII CIC, 2020;*

- **JEREZ, G. O.**; PROL, F. S.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. *Analysis of the coverage of radio occultation electron density profiles over the Brazilian region. In: 20th International Beacon Satellite Symposium, 2019, Olsztyn. Proceedings of International Beacon Satellite Symposium, 2019.*

- MATHIAS, M. V. T.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** *Estudo de perfis atmosféricos a partir da técnica de rádio ocultação. In: XXXI Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2019, Presidente Prudente. Anais do XXXI CIC, 2019;*

- SILVA, B. P.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** *Influência da cintilação ionosférica na qualidade do posicionamento GNSS em diferentes regiões do Brasil. In: XXXI Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2019, Presidente Prudente. Anais do XXXI CIC, 2019;*

- VIEIRA, J. V. E.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.**; SILVA, C. M. *Influência do comportamento da ionosfera no posicionamento relativo com integração GPS e GLONASS. In: XXXI Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2019, Presidente Prudente. Anais do XXXI CIC, 2019;*

- SILVA, B. P.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.**; MATHIAS, M. V. T. Análise da influência do Conteúdo Total de Elétrons na qualidade do posicionamento por ponto preciso em diferentes regiões do Brasil. In: 30º Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2018, Presidente Prudente. **Anais do 30º CIC**, 2018.
- MATHIAS, M. V. T.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.**; SILVA, B. P. Avaliação das variações do comportamento do Conteúdo Total de Elétrons e do índice S4 em diferentes regiões brasileiras. In: 30º Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2018, Presidente Prudente. **Anais do 30º CIC**, 2018.
- BENEDITO, B. L.; TACHIBANA, V. M.; **JEREZ, G. O.**; HALTER, V.; MARANGON, R. A. Ingressão do Skate como modalidade experimental nos jogos universitários da UNESP. In: 30º Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2018, Presidente Prudente. **Anais do 30º CIC**, 2018.
- SANTOS, V. A.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.** Avaliação do desempenho de dados virtuais GPS e GLONASS para posicionamento na região brasileira. In: XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2017, Presidente Prudente. **Anais do XXIX CIC**, 2017.
- VIEIRA, J. V. E.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.**; LIMA, T. M. A. Desempenho do posicionamento com dados GLONASS em diferentes latitudes. In: XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2017, Presidente Prudente. **Anais do XXIX CIC**, 2017.
- LIMA, T. M. A.; ALVES, D. B. M.; **JEREZ, G. O.**; VIEIRA, J. V. E. Análise de modelos de correção ionosférica para posicionamento utilizando o sistema de navegação GLONASS. In: XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2017, Presidente Prudente. **Anais do XXIX CIC**, 2017.