



Avaliação de mapas ionosféricos na região brasileira sob diferentes condições da atividade solar

Evaluation of ionospheric maps in the Brazilian region under different solar activity conditions

Lucas dos Santos Pinheiro¹, João Francisco Galera Monico², Claudinei Rodrigues de Aguiar³

RESUMO

Em termos de propagação de sinais entre satélites e receptores na atmosfera terrestre, um dos grandes impasses está em uma camada desse caminho: a ionosfera. O estudo sobre a mesma vem crescendo nos últimos anos, na tentativa de modelar o seu comportamento e minimizar o impacto sobre sua utilização para fins importantes, como o posicionamento por GNSS que pode ser utilizado para a agricultura de precisão, por exemplo, necessitando de alta acurácia. Porém, dependendo da frequência e da quantidade de elétrons livres na camada ionosférica (estes sendo os responsáveis por alterar a velocidade de propagação dos sinais), o erro na medida pode ser por vezes, maior que o recomendado para o uso de certos equipamentos. Para o monitoramento da camada, utilizam-se redes GNSS ativas, por exemplo, a RBMC, no caso do Brasil. Com isso, alguns modelos de correção são gerados e nesse trabalho se analisará a qualidade da correção dos arquivos IONEX do *software* GIB, comparando-os com de órgãos como o IGS e o MAGGIA, para datas entre o ciclo solar 24 e 25, analisando o impacto dele e da variação sazonal no erro causado pela camada ionosférica.

PALAVRAS-CHAVE: GIB; GNSS; IONEX; Ionosfera; MAGGIA;

ABSTRACT

In terms of signal propagation between satellites and receivers in the Earth's atmosphere, one of the biggest impasses is in one layer of this path: the ionosphere. The study of it has been growing in recent years, in an attempt to model its behavior and minimize the impact on its use for important purposes, such as GNSS positioning that can be used for precision agriculture, for example, requiring high accuracy. However, depending on the frequency and the amount of free electrons in the ionospheric layer (these are responsible for changing the propagation speed of the signals), the measurement error can sometimes be greater than that recommended for the use of certain equipment. To monitor the layer, active GNSS networks are used, for example, RBMC, in the case of Brazil. With this, some correction models are generated and this work will analyze the quality of the correction of the IONEX files from the GIB software, comparing them with files from organizations such as IGS and MAGGIA, for dates between solar cycle 24 and 25, analyzing the impact of it and seasonal variation in the error caused by the ionospheric layer.

KEYWORDS: GIB; GNSS; IONEX; Ionosphere; MAGGIA;

INTRODUÇÃO

Hoje em dia, na utilização de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), há ciência da ocorrência de erros causados de diversas fontes, que pode gerar uma interferência de ordem métrica nos resultados obtidos pelos receptores, inviabilizando a utilização de alguns equipamentos para certas finalidades de devida importância, pois não atingem a acurácia mínima requerida.

¹ Bolsista do INCT. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: lucaspinheiro@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 3166902655567227.

² Docente no Curso de Cartografia – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil. E-mail: galera.monico@unesp.br. ID Lattes: 7180879644760038.

³ Docente no Curso de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: rodriguesaguiar@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8291654390257535.



A principal fonte de erro direta é no caminho entre o satélite e o receptor, de forma que, passando pelas camadas da atmosfera, o sinal pode sofrer alterações e afetar o resultado final. Uma delas é a ionosfera, uma camada ativa e que sofre ionização por radiação solar (mais comum, ionizando uma porção de moléculas de gás) ou por impacto (menos comum) (NARDIN, 2009). Essa ionização que, dependendo da região, podem ter mais ou menos íons, causa a produção de elétrons livres, responsáveis pelo erro final.

Com a necessidade de maior conhecimento sobre a camada da ionosfera, essa sendo a responsável pela alteração na velocidade de propagação dos sinais de rádio entre os satélites e os receptores, existem índices que são gerados e monitorados com o intuito de fornecer informações para análise, que em conjunto dão um panorama sobre a situação da atividade geomagnética a todo o momento.

Dessa forma, também existem os softwares de correção que ajudam a minimizar esses erros ionosféricos, fazendo a utilização de modelos, como o de Klobuchar (1987), o Mod_ION (Camargo, 1999), entre outros. Nesse trabalho, será utilizado para comparação o LPIM (*La Plata Ionospheric Model, utilizado pelo MAGGIA*), o GIM (*Global Ionospheric Model, utilizado pelo Center for Orbit Determination in Europe do IGS*) e o GIB (*Grade Ionosférica Brasileira*), de Aguiar (2010). Além da correção, os modelos podem ajudar no estudo do comportamento da ionosfera, um dos objetivos das análises feitas acerca da camada localizada entre 50km e 1000km acima da superfície terrestre.

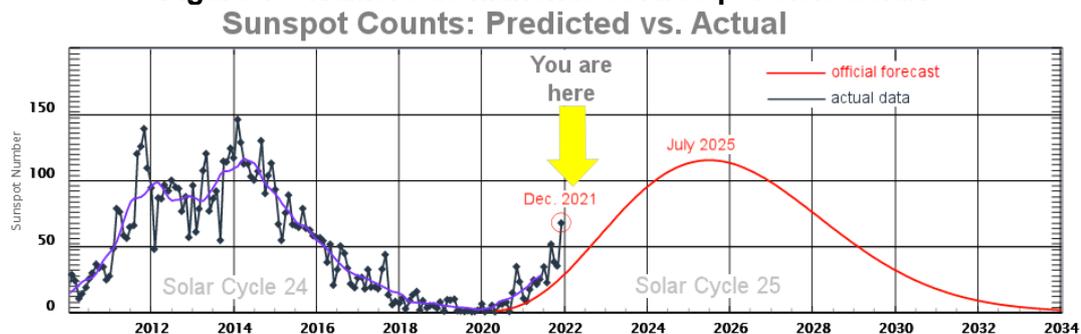
MATERIAIS E MÉTODOS

SELEÇÃO DAS ÉPOCAS A SEREM ANALISADAS

Há diversas formas de se analisar a qualidade da correção dos produtos dos mapas ionosféricos, GIM (*Global Ionospheric Maps*), distribuídos no formato IONEX (IONosphere Map EXchange), gerados para minimizar o impacto da ionosfera nas medidas finais dos receptores através dos modelos ionosféricos citados anteriormente. Alguns órgãos geram esses produtos IONEX e disponibilizam para correção, como é o caso do Laboratório MAGGIA (*Laboratorio de Meteorología espacial, Atmósfera terrestre, Geodesia, Geodinámica, diseño de Instrumental y Astrometría*) e o IGS (*International GNSS Service*), que se utilizará nesse trabalho.

Sabendo dessas informações, utilizou-se como critério para seleção das datas a analisar-se o seguinte: (1) período do ciclo solar; (2) posição do Sol em relação à Terra. Seguindo essa linha, decidiu-se por analisar datas próximas aos equinócios e solstícios e no pico do ciclo solar 24 e começo do ciclo solar 25, de acordo com a figura 1:

Figura 1 – Número de manchas solares por ciclo solar.



Fonte: SpaceWeather (2023)



A figura 1 mostra o número de manchas solares, sendo o pico do ciclo solar no maior número de manchas solares. Analisando a imagem é possível notar que o pico do ciclo solar 24 foi entre 2013 e 2014 e a baixa (entre os ciclos) aconteceu entre 2019 e 2020. Portanto, conhecendo-se o pico e a mínima do ciclo, pode-se dividir as datas em 4 etapas: solstício de inverno, solstício de verão, equinócio de outono e equinócio de primavera.

Com o auxílio dos dados fornecidos pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), é possível analisar os índices Kp e Dst solar, que estão correlacionados e mostram a atividade magnética, por exemplo, o Kp é um índice local de variação magnética num período de 3 horas relativa a um dia “calmo” (INPE, 2023). Já o índice Dst calcula a média dos valores da força do campo magnético na terra, sendo -20nT o médio e caracterizando tempestades geomagnéticas para valores abaixo de -250nT(PREFEITURA DE CUIABÁ, 2019). Na figura 2 pode-se analisar um dia com grande atividade geomagnética, relacionando o índice com uma tempestade.

Figura 2 – Valores de nT para os dias 17 e 18 de março de 2015.

Dia	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	Med
17 (076)	4	3	3	2	13	45	25	-18	-54	-83	-75	-54	-55	-75	-93	-118	-143	-162	-154	-177	-182	-198	-234	-225	-83.542
18 (077)	-200	-189	-172	-155	-148	-136	-133	-124	-123	-117	-111	-99	-97	-91	-88	-91	-86	-82	-88	-94	-95	-94	-94	-93	-116.667

Fonte: Adaptado de INPE (2023).

Com essa informação, pode-se notar a atividade com altos valores após as 17h do dia 17, perdurando até a metade do dia seguinte, apontado pelo INPE como uma tempestade geomagnética no boletim do dia 18. Como complemento, na figura 3 apresenta-se os valores de Kp para os mesmos dias, sinalizando valores muito altos e que continuaram nos dias subsequentes, gerando certa curiosidade e escolheram-se as datas de 16 a 20 de março de 2015 para uma análise extra. Logo, essas se somam com as outras datas a serem analisadas: (i) 20 a 25 de dezembro de 2020 e 2014; (ii) 20 a 25 de junho de 2020 e 2014.

Figura 3 – Valores do índice Kp para os dias 17 e 18 de março de 2015.

Dia	0h	3h	6h	9h	12h	15h	18h	21h	Total
17 (076)	2.0	4.7	5.7	5.3	7.7	7.7	7.3	7.7	48.0
18 (077)	6.0	4.7	4.3	4.3	5.3	5.3	4.7	4.7	39.3

Fonte: Adaptado de INPE (2023).

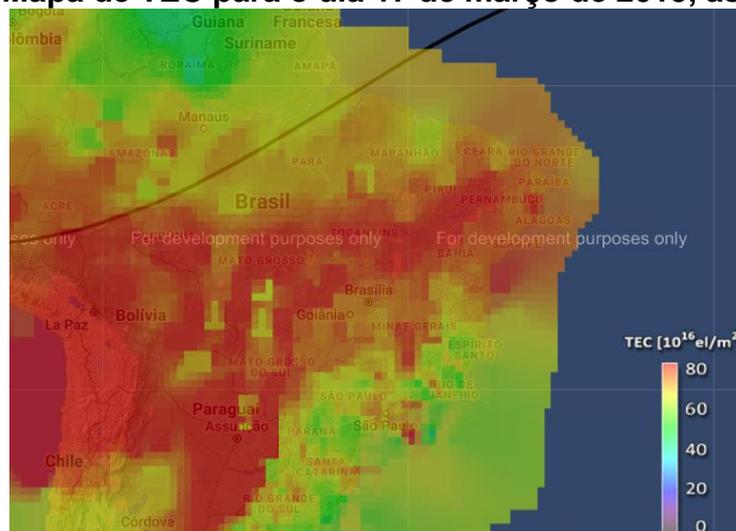


As datas selecionadas correspondem aos solstícios durante o ano completo, dessa forma possibilita-se analisar no período de maior incidência solar no pico do ciclo solar (2014) e na baixa (2020), podendo notar sua interferência nos resultados. Além disso, a correção pode ser testada de melhor forma, pois, como as datas foram escolhidas com o auxílio dos índices Kp e Dst, notou-se uma atividade moderada nelas para esses anos e decidiu-se por estudar e comparar nesse período.

SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS

Com a seleção das estações, busca-se poder analisar a interferência da anomalia geomagnética na linha do Equador, que se localiza sobre o norte do território brasileiro e afeta a concentração de elétrons que deveria estar concentrados nessa região, desviando-os para 12°-20° ao norte ou sul magnético da linha (Silva, 2018). Na figura 4, pode-se perceber uma alta concentração de elétrons acima e abaixo da linha, além de valores extremamente altos para o horário (20h00min UTC), devido à tempestade ocorrida no dia.

Figura 4 – Mapa de TEC para o dia 17 de março de 2015, às 20h00min.



Fonte: INPE (2023).

Logo, escolheram-se 5 estações, localizadas acima, abaixo e exatamente acima da linha da anomalia equatorial, sendo elas: BELE, BOAV, BRAZ, MSCG e ROJI, de acordo com a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo).

ANÁLISE E COMPARAÇÃO

A comparação será realizada entre os produtos IONEX disponibilizados pelo MAGGIA, pelo IGS e o produto gerado pelo GIB. Logo, se utilizarão as efemérides precisas disponibilizadas pelo IGS e os arquivos RINEX disponibilizados pelo IBGE para realizar o processamento pelo RTKLib (Takasu, 2013) de forma automatizada.

Dessa forma, para a identificação dos produtos, serão nomeados da seguinte maneira: (I) CODE_Cor, (II) GPGR_Cor, (III) MAGG_Cor e (IV) S_Cor, sendo a sequência de correção do IONEX CODE, IONEX GIB e IONEX MAGGIA, com o último (IV) sem correção.

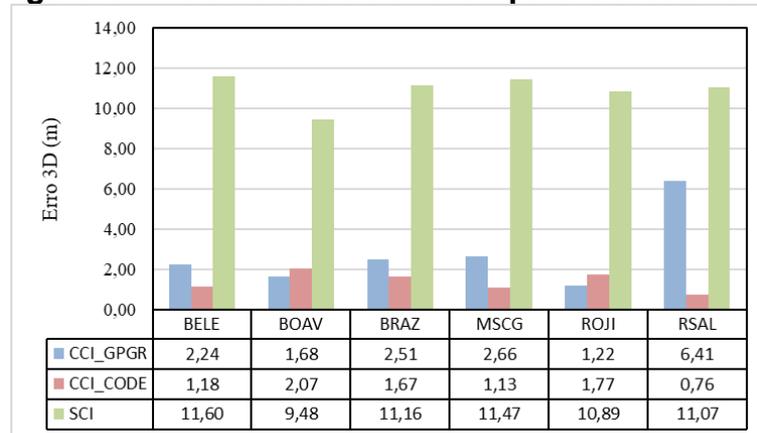


As coordenadas das estações selecionadas podem ser obtidas nos descritivos do RBMC, logo, adotaram-se essas coordenadas como as verdadeiras e irá realizar-se a comparação das coordenadas obtidas com a correção dos IONEX em relação à coordenada obtida do RBMC. Isto é, possibilita-se o cálculo via *software* Excel dos seguintes itens: (i) Erro médio; (ii) RMSE (*Root Mean Square Error*), ou raiz do erro médio quadrático.

RESULTADOS ESPERADOS

Após a análise espera-se realizar uma comparação com as correções obtidas dos modelos utilizados na pesquisa com o modelo do GIB, assim realizando a validação de seu produto IONEX para correção a partir de sua eficiência comparada a de produtos disponibilizados pelo IGS e pelo *Laboratório MAGGIA*. Em uma análise realizada previamente pode-se comparar o desempenho do IONEX GPGR em relação ao do CODE.

Figura 5 – Resultados de erro 3D para dia 353/2013.



Fonte:

Logo, com uma atividade magnética mais elevada, acredita-se que o erro final para todos os produtos com correções seja maior, pois as leituras iniciais podem ter sido muito mais afetadas por conta do elevado TEC. Ou seja, além da comparação, espera-se que seja possível analisar a influência do ciclo solar, da anomalia equatorial e da variação sazonal, apesar de compararem-se os dois solstícios.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea (INCT GNSS-NavAer), financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – processo 465648/2014-2), FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – processo 2017/50115-0) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – processo nº 88887.137186/2017-00), pelo suporte financeiro.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.



REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. R.. **Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS**. 2010. Tese (Doutorado em ciências cartográficas) - Setor de Ciências e Tecnologia - UNESP, Presidente Prudente, 2010.

CAMARGO, P. O.. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências da Terra Universidade Federal do Paraná, [S. I.], 1999.

DE NARDIN, Clézio Marcos. **Introdução à Ionosfera Terrestre**. In: DE NARDIN, Clézio Marcos. **Introdução à Ionosfera Terrestre**. INPE, 21 nov. 2009. Disponível em: http://www.dae.inpe.br/~clezio.denardin/SCI_iono_main.htm. Acesso em: 23 jun. 2022.

INPE (Brasil). **DST/SSN: Base de dados INPE**. [S. I.], 2023. Disponível em: <https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/dstssn/>. Acesso em: 9 ago. 2023.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for SingleFrequency GPS Users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, [s. l.], v. 23, ed. 3, Maio 1987.

MCTI (Brasil). INPE. **Índice de variação magnética planetária (Kp)**. [S. I.], 5 jan. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/obter-o-indice-de-variacao-magnetica-planetaria-inpe-kp#:~:text=O%20%C3%ADndice%20planet%C3%A1rio%20Kp%20%C3%A9,%2B%20%C3%A9%205%201%2F3>. Acesso em: 9 ago. 2023.

PREFEITURA DE CUIABÁ (Brasil). SMADESS. **Estudo: tempestade solar de 1921 pode ter pior que o famoso “Evento Carrington” de 1859 – e pode se repetir em breve**. [S. I.], 7 out. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/obter-o-indice-de-variacao-magnetica-planetaria-inpe-kp#:~:text=O%20%C3%ADndice%20planet%C3%A1rio%20Kp%20%C3%A9,%2B%20%C3%A9%205%201%2F3>. Acesso em: 9 ago. 2023.

SILVA, G. A.. **Anomalia equatorial de ionização e a propagação de sinais de rádio**. 2018. Tese (Pós Graduação) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018. Acesso em: 5 maio 2022.

SPACEWEATHER. **Solar Cycle 25 Update**. [S. I.], 9 jan. 2022. Disponível em: <https://spaceweatherarchive.com/2022/01/09/solar-cycle-25-update/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

TAKASU, T. **RTKLib: an open source program package for GNSS positioning**. 2007-2013. Disponível em: <http://rtklib.com/>.