



## Análise da qualidade do mapa ionosférico IONEX gerado pelo modelo ionosférico GIB no ciclo solar 24

Thalles Felipe Kovalczuk Ribeiro<sup>1</sup> Vitória Narita Dantas<sup>2</sup> Carlos Eduardo Messias Godoi<sup>3</sup> Claudinei Rodrigues de Aguiar<sup>4</sup>

20 novembro 2017

Resumo – O Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) é utilizado cada vez mais em diversas aplicações como agricultura, navegação aérea, marítima e terrestre, entre outras. Contudo, os sinais desse sistema sofrem a influência de diversas fontes de erros, principalmente proveniente da ionosfera terrestre destacando-se o efeito da refração ionosférica. Esse erro, oriundo da ionosfera, pode ser minimizado através da adoção de modelos matemáticos que buscam descrever a ionosfera, como o GIB (Grade Ionosférica Brasileira). Este trabalho buscou analisar a eficiência do GIB e compará-lo com o modelo CODE (Centro Europeu de Determinação de Órbita) em variadas situações de comportamento ionosférico. Os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando melhora na acurácia e no desvio padrão das coordenadas corrigidas.

Palavras-chave: IONEX. Grade ionosférica. GNSS.

### 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) foi desenvolvido com o objetivo de prover informações de posição, velocidade e tempo (PVT). O primeiro sistema desse tipo, inicialmente para fins militares, foi o GPS (*Global Positioning System*) desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (USNO, 2017). Entretanto, devido à alta precisão fornecida emergiram usuários da comunidade civil e científica. Desde sua total operacionalização a partir de 1994, o GPS é o GNSS mais utilizado em relação aos demais, e nos últimos anos passou por um processo de

modernização melhorando a sua performance em diversos níveis de aplicações.

Entretanto, o posicionamento com o GNSS está sujeito a diversas fontes de erros sistemáticas, as quais degradam a qualidade dos resultados obtidos com esse sistema, limitando o seu uso em algumas aplicações, como por exemplo no monitoramento de estruturas. A principal fonte de erro nos sinais GNSS é devido ao atraso dos sinais rastreados pelo receptor ocorrendo, principalmente, na camada ionosférica terrestre. Esse erro está diretamente associado ao Conteúdo Total de Elétrons livres (TEC - *Total Electron Contents*) presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal. Esse erro, assim como o TEC,

<sup>1</sup> thalleskovalczuk@gmail.com, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.

<sup>2</sup> vic\_narita@hotmail.com, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.

<sup>3</sup> carlosgodoi.2016@alunos.utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.

<sup>4</sup> rodriguesaguiar@utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.



varia no tempo e no espaço e sofrem influências diretas de fatores como incidência e atividades solares, entre outros (AGUIAR, C. R.; KOZELINSKI, 2015).

Neste contexto, foram desenvolvidos e implementados, em forma de algoritmos, modelos matemáticos que descrevem o comportamento ionosférico a fim de corrigir estes erros e melhorar a confiabilidade do posicionamento GNSS. Dentre esses modelos ionosféricos citam-se, no Brasil, o Modelo Regional da Ionosfera (Mod\_Ion), desenvolvido por Camargo (1999) – sendo analisado posteriormente implementado para aplicações em tempo real por Aguiar (2005) – e o da Grade Ionosférica Brasileira (GIB) desenvolvido por Aguiar (2010).

Portanto, este trabalho apresenta a avaliação da qualidade da correção dos sinais GNSS a partir dos mapas ionosféricos em formato IONEX (*IONosphere map EXchange*) gerados pelo modelo GIB nas mais variadas situações ionosféricas.

### 1.1 Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O algoritmo do GIB está preparado para processar os sinais do sistema GPS, devido sua ampla utilização, facilitando sua aquisição e processamento. Atividades futuras contemplam a atualização do GIB para processar dados do sistema Russo, o GLONASS (*GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), e do Galileo, desenvolvido pela União Européia.

O GPS é o sistema GNSS mais utilizado atualmente, seu funcionamento tem como base a medida da distância entre o receptor do usuário e de pelo menos 4 satélites (MONICO, 2008). A distância medida, se dá pela emissão de um sinal e registro do tempo de viagem desse até atingir a antena receptora.

Os sinais de GPS são transmitidos em três diferentes comprimentos de onda, sendo essas denominadas como fase de ondas portadoras ( $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_5$ ), sendo cada uma transmitida nas respectivas frequências:  $L_1$  (1577,42 MHz),  $L_2$  (1227,60 MHz) e  $L_5$  (1176,45 MHz). A partir do rastreamento desses sinais os receptores GNSS são capazes de medir as observáveis fase da

onda portadora e pseudodistância, as quais permitem determinar a distância geométrica entre as antenas do satélite e do receptor e, subsequentemente, determinar a posição tridimensional da antena do receptor.

Considerando que a ionosfera apresenta natureza dispersiva, e os satélites do GPS transmitem sinais em pelo menos duas frequências, é possível determinar o erro sistemático ionosférico de primeira ordem por meio da combinação linear livre da geometria das observáveis GNSS, desde que se tenha à disposição receptores GNSS de no mínimo dupla frequência. Dessa forma, as redes GNSS ativas se constituem em uma importante estrutura para fornecer dados na modelagem ionosférica.

### 1.2 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) e *International GNSS Service* (IGS)

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), administrada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é uma rede de referência GNSS ativa, composta por com 135 estações (setembro/2017) distribuídas nas mais diversas áreas do território nacional, como mostrado na Figura 1. Essa rede tem por objetivo coletar e armazenar as observações do código e da fase de ondas transmitidas pelos satélites GPS ou GLONASS, bem como materializar o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), sendo a infraestrutura básica para todos os trabalhos geodésicos e de mapeamento realizados no Brasil. Cada estação da RBMC possui um receptor e antena geodésica, conexão de Internet e fornecimento constante de energia elétrica que possibilita a operação ininterrupta da estação (IBGE, 2017).

A operação dessas estações é completamente automatizada, suas observações são organizadas em arquivos diários com sessões iniciadas às 00h 01min e finalizadas às 24h 00min de acordo com o tempo universal (UT – *Universal Time*). Posteriormente, os dados com as respectivas observações são transferidos para o Centro de Controle da RBMC - Kátia Duarte Pereira, onde esses dados são incluídos em novos



arquivos no formato padrão de RINEX (*Receiver INdependent EXchange*), versão 2.x, nos quais é realizado um controle de qualidade sobre os dados observados. Posteriormente esses arquivos são disponibilizados para *download* pelo IBGE (IBGE, 2017).



Figura 1 – Mapa de estações RBMC  
Fonte: IBGE (2017).

Algumas estações da RBMC também compõem a rede do *International GNSS Service* (IGS), a qual consiste em uma rede de monitoramento de mais de 350 estações de monitoramento GPS de mais de 200 agências distribuídas em aproximadamente 80 países, seus recursos, como os dados de órbitas, são utilizados na geração de dados precisos de GNSS utilizados para as mais variadas aplicações (NASA, 2012).

### 1.3 Efeitos da Ionosfera

De acordo com Hargreaves (1992), pode-se descrever a atmosfera terrestre como um conjunto de camada

de gases, esféricas e concêntricas à Terra, apresentando diferentes propriedades físicas e químicas entre si. Segundo Aguiar (2010), tratando-se da análise de propagação de ondas eletromagnéticas, a atmosfera pode ser dividida em troposfera e ionosfera, pois elas se propagam neste meio, onde sofrem diferentes influências. Segundo Jacowski (2012), ao se propagar pela ionosfera, o sinal GNSS pode sofrer a influência de elétrons presentes nesta camada, sendo a densidade destes quantificada pelo TEC. Apesar disso, a quantificação destas mudanças de onda, oferecem informações de grande importância sobre o nível de ionização da atmosfera.

Outro efeito que influencia as ondas de sinal GNSS é o da cintilação ionosférica, que se trata de rápidas variações aleatórias na fase e amplitude deste sinal, este efeito é causado por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera (AGUIAR, 2010; ALVES; ABREU; SOUZA, 2013; ROCHA et al., 2017).

### 1.4 Índices de monitoramento da atividade ionosférica (Kp, DST e F10.7cm)

Como já mencionado, o principal fator de degradação da qualidade do posicionamento GNSS está na influência que a ionosfera exerce sobre os sinais transionosféricos. Além disso, a magnitude da influência ionosférica varia no tempo e no espaço em função de diversos fatores, dentre os quais destaca-se o comportamento dinâmico ionosférico, envolvendo também fenômenos como a tempestade ionosférica, cintilação, bolhas de plasma, deslocamento vertical do plasma, anomalia equatorial, entre outros que são observados frequentemente em regiões de baixa latitude, na qual o Brasil se encontra.

Para inferir sobre a atividade ionosférica há índices geomagnéticos, estimados a partir de séries de dados de sensoriamento da atmosfera terrestre e da atividade solar, os quais permitem o monitoramento do comportamento dessa camada. Segundo Aguiar (2010) esses índices são importantes para correlacionar a magnitude dos efeitos da ionosfera sobre os sinais GNSS, em função do nível de atividade



geomagnética e solar. Dentre esses índices pode-se citar o Dst (*Disturbance Storm-Time*), o F10.7 (*Solar Flux at 10.7 cm*) e o Kp (*Planetary K-index*).

O índice Dst (dado em nano Tesla – nT) indica a atividade magnética próxima a região da linha do equador. Esse índice é derivado de escalas horárias de variação magnética horizontal de baixa latitude, cujas medidas magnetométricas são obtidas por uma cadeia de magnetômetros, localizados na região equatorial (AGUIAR, 2010). Assim, o Dst representa a intensidade da atividade geomagnética e desta forma, sendo comumente utilizado para conhecer a severidade das tempestades magnéticas que ocorrem nas regiões equatoriais de baixa latitude. A intensidade das tempestades ionosféricas pode ser classificada a partir do Dst conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das tempestades pelo índice Dst

Valores da Classificação do Dst	
-50 nT ≤ Dst < -30nT	Fraca
-100 nT ≤ Dst < -50nT	Moderada
-250 nT ≤ Dst < -100nT	Intensa
Dst < -250nT	Muito intensa

Fonte: Aguiar (2010).

Outro índice utilizado para classificar a atividade ionosférica é o Kp, o qual retrata a intensidade do fluxo solar e as perturbações causadas na atmosfera terrestre. O índice Kp quantifica a perturbação do campo magnético terrestre, sendo este expresso por valores inteiros em um intervalo de 0 a 9, indicando tempestades geomagnéticas (SWPC, 2017a).

Além do Dst e Kp, o F10.7cm é um índice que expressa a incidência solar no comprimento de onda de 10,7 cm, ou seja, na frequência de 2800 MHz. Este índice é um dos mais amplos registros de atividade solar, correlacionando-se bem com o número de manchas solares, índices de raios ultravioleta e irradiação solar (SWPC, 2017b).

### 1.5 Grade Ionosférica Brasileira (GIB).

O GIB é um aplicativo computacional que implementa os modelos desenvolvidos por Aguiar (2010), onde há

o cálculo do atraso ionosférico na direção satélite/receptor e sua projeção para a direção vertical em todos os pontos ionosféricos (IPP – *Ionosphere Pierce Point*) observados por uma estação de referência, seguida pela estimativa do atraso de hardware dos satélites e receptores, bem como geração de uma grade do atraso ionosférico vertical utilizando funções de interpolação adaptativas e seu nível de confiança (GIVE – *Grid Ionospheric Vertical Error*). A partir dessa grade é possível estimar o atraso ionosférico e o limite de confiança (GIVE) para o usuário (AGUIAR; KOZELINSKI, 2015).

Para gerar a modelagem ionosférica no GIB estima o atraso ionosférico absoluto, a partir de observáveis GPS coletadas pelas estações de referência da RBMC. Assim, o atraso ionosférico sofrido pelos sinais dos satélites é a partir da combinação linear livre da geometria da pseudodistância suavizada pela fase (PS) (AGUIAR, 2010):

$$I_{L_1}^V = sf(z')_r^s \frac{(PS_2 - PS_1)_r^s}{\gamma - 1} - \frac{c(b^2 - b_r)}{\gamma - 1} \quad (1)$$

onde  $I_{L_1}^V$  é o atraso ionosférico em metros em  $L_1$ , na direção vertical. O termo  $sf(z')_r^s$  é a função de mapeamento que projeta o atraso ionosférico da direção satélite/receptor para a vertical (AGUIAR, 2010). A constante  $\gamma = f_{L_1}^2 / f_{L_2}^2 = (77 / 60)^2$ , para observáveis GPS, é obtida a partir das frequências  $L_1$ - $L_2$  e converte o erro para  $L_2$ . Os termos  $b_s$  e  $b_r$  representam as tendências interfrequência dos satélites e dos receptores, respectivamente.

Outro ponto de destaque é que o modelo desenvolvido possibilita o uso tanto em modo pós-processamento, quanto em processamento *online*, ou seja, em tempo real, pois a implementação do modelo foi desenvolvida e adaptada para estimativas utilizando o filtro de Kalman, para a assimilação dos dados GPS em tempo real, quando esses são disponibilizados via protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Mais



detalhes sobre o algoritmo e modelos matemáticos adotados no GIB podem ser encontrados em Aguiar (2010).

## 2. METODOLOGIA

Através da análise dos dados do índice F10.7 cm registrado ao longo dos anos, é possível observar um comportamento cíclico da incidência de raios solares, são os chamados ciclos solares, com períodos de 11 anos. Atualmente se está no final do ciclo 24, como pode-se observar na Figura 2, que teve seu pico por volta do ano de 2014 e seu período de menor atividade entre 2009 e 2010.

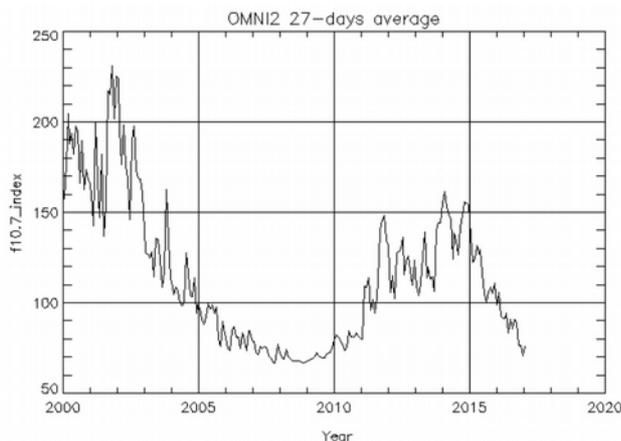


Figura 2 – Índice F10.7 no período de 2000 a 2017  
Fonte: SPDF (2017).

O nível da atividade solar, é entre muitos uns dos principais agentes que influenciam a densidade de elétrons e o comportamento dinâmico na ionosfera, onde em períodos de alta do fluxo solar há aumentando no processo de ionização e consequentemente são os períodos quando se observam os maiores erros na navegação e no posicionamento por GNSS.

Assim, analisando o índice F10.7 para a execução deste trabalho, foram escolhidos os anos de 2014, para a análise do comportamento ionosférico em períodos de alta atividade solar, e de 2010, para a análise no período de baixa atividade solar.

Posteriormente foi estabelecido a análise dos meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro, para os dois períodos de atividade, a fim de abranger diferentes estações do

ano e consequentemente diferentes incidências solares. Analisou-se o índice Dst dos respectivos meses a fim de identificar 4 (quatro) dias consecutivos com comportamento ionosférico classificado como geomagneticamente calmo, para processamento no GIB.

Os dados GPS, utilizados para o processamento e a geração da grade ionosférica referente ao período selecionado, foram obtidos pelas estações da RBMC, disponibilizados pelo IBGE, além dos dados de órbita, disponibilizados pelo IGS. Cada dia é orientado segundo o calendário GNSS, tendo um número relativo a cada dia do ano (DOY – Day of Year) e um número para cada semana, denominada semana GPS, assim, é possível encontrar os arquivos necessários ao processamento dos dados no modelo GIB.

Agrupados os arquivos, o programa GIB os processa e gera mapas ionosféricos no formato IONEX, com resolução espacial a partir de 1° em latitude e 1° em longitude e resolução temporal de 10 minutos.

Em todos os processamentos, foi removida a estação de Presidente Prudente (PPTE), para realização do pós-processamento considerando esta como receptor GPS, simulando um usuário do sistema.

Após o processamento pelo GIB, utilizou-se o software RTKLIB 2.4.2 (TAKASU, 2013), distribuído sob a licença BSD-2-Clause, a fim de aplicar o método de posicionamento por ponto (VANI; MONICO; SHIMABUKURO; 2014) e calcular as coordenadas X, Y e Z relativas a estação PPTE. Para a análise da qualidade das correções, utilizou-se os arquivos de coordenadas gerados pelo software sem correção ionosférica (SCI), com a correção pelo GIB e com a correção fornecida pelos mapas globais do CODE, ambas em formato IONEX.

Através dos arquivos obtidos pelo pós-processamento, calculou-se as discrepâncias (Dx, Dy e Dz) entre cada coordenada através da equação 2, onde as coordenadas verdadeiras (ou de referência) são fornecidas pelo IBGE na época de 2000,4, referente ao dia 25 de maio de 2000, e posteriormente, corrigidas para a época do processamento através do



software online TReVel (PROL et al, 2014) disponibilizado pelo Grupo de Estudos e Pesquisa Geodésica da UNESP.

$$\begin{aligned}
 D_X &= X_{calculada} - X_{verdadeira} , \\
 D_Y &= Y_{calculada} - Y_{verdadeira} , \\
 D_Z &= Z_{calculada} - Z_{verdadeira} . \quad (2)
 \end{aligned}$$

Para melhor análise, calculou-se o valor das discrepâncias resultantes em três dimensões ( $D_{3D}$ ) através da equação 3.

$$D_{3D} = \sqrt{(D_X)^2 + (D_Y)^2 + (D_Z)^2} \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através do processamento pelo GIB e pós processamento pelo *software* RTKLIB, obteve-se um conjunto de coordenadas X, Y e Z onde foi possível realizar o cálculo das discrepâncias  $D_{3D}$ . Com estes valores calculou-se a média e o desvio padrão, bem como verificou-se o valor máximo e o mínimo do conjunto de valores do dia, o mesmo procedimento foi realizado para o arquivo RINEX com a correção ionosférica a partir do IONEX do GIB e do CODE. Os valores referentes aos dias de alta atividade podem ser observados na Tabela 2 e os de baixa atividade na Tabela 3, onde são apresentados os valores obtidos com a correção disponibilizada pelo CODE, pelo GIB e sem a aplicação de qualquer correção (SCI).

Tabela 2 – Estatísticas das discrepâncias para o período de alta atividade solar

Dia	Correção	Média (m)	$\sigma$ (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)
1	SCI	3,733	2,568	34,272	0,285
	CODE	2,499	2,367	38,022	0,090
	GIB	3,403	2,043	47,952	0,064
2	SCI	4,582	2,892	15,932	0,310
	CODE	2,840	2,579	15,306	0,153
	GIB	3,489	2,349	18,578	0,247
3	SCI	3,481	2,197	12,895	0,270
	CODE	2,395	2,007	12,463	0,047
	GIB	2,774	1,874	15,294	0,101

Tabela 2 – Continuação...

Dia	Correção	Média (m)	$\sigma$ (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)
4	SCI	4,199	3,202	20,801	0,314
	CODE	2,971	3,194	18,358	0,154
	GIB	4,239	2,904	25,517	0,243
102	SCI	4,241	3,464	19,908	0,121
	CODE	2,771	2,991	26,545	0,100
	GIB	4,025	2,766	39,687	0,257
103	SCI	5,855	3,625	17,735	0,471
	CODE	2,472	1,834	8,746	0,078
	GIB	3,189	2,444	17,767	0,112
104	SCI	5,585	4,006	24,777	0,175
	CODE	2,787	3,101	16,925	0,096
	GIB	3,938	2,338	26,170	0,289
105	SCI	6,840	5,273	40,394	0,061
	CODE	2,787	3,101	16,925	0,096
	GIB	3,815	2,698	44,153	0,297
193	SCI	2,256	1,576	10,411	0,024
	CODE	1,301	0,861	13,157	0,050
	GIB	2,510	1,906	19,111	0,258
194	SCI	2,216	1,632	12,722	0,044
	CODE	1,160	0,889	16,454	0,041
	GIB	3,914	9,394	265,960	0,141
195	SCI	2,236	1,731	12,705	0,034
	CODE	1,113	0,953	17,078	0,044
	GIB	2,369	5,346	157,161	0,183
196	SCI	1,890	1,326	16,006	0,022
	CODE	1,351	1,247	23,677	0,039
	GIB	1,930	1,579	27,589	0,049
197	SCI	1,890	1,326	16,006	0,022
	CODE	1,228	1,024	16,959	0,019
	GIB	2,414	2,608	25,632	0,098
299	SCI	5,471	4,722	28,581	0,223
	CODE	3,341	3,292	17,987	0,106
	GIB	3,478	3,178	27,432	0,085
300	SCI	4,821	3,109	22,500	0,321
	CODE	2,437	2,233	18,227	0,107
	GIB	4,129	2,605	20,114	0,207
301	SCI	5,741	4,881	24,350	0,134
	CODE	3,234	2,859	14,318	0,103
	GIB	6,995	3,993	25,500	1,316
302	SCI	4,931	3,709	18,890	0,063
	CODE	2,723	2,361	12,611	0,211
	GIB	6,506	3,001	17,547	1,802

Tabela 3 – Estatísticas das discrepâncias para o período de baixa atividade solar

Dia	Correção	Média (m)	$\sigma$ (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)
5	SCI	4,146	2,924	13,684	0,123
	CODE	2,014	1,134	8,071	0,072
	GIB	2,867	5,780	82,745	0,032
6	SCI	1,959	0,909	6,139	0,040
	CODE	1,829	0,989	7,688	0,071
	GIB	1,768	1,523	18,850	0,103
7	SCI	4,210	2,328	11,639	0,050
	CODE	1,829	0,989	7,688	0,072
	GIB	1,768	1,523	18,850	0,103



Tabela 3 – Continuação...

Dia	Correção	Média (m)	$\sigma$ (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)
8	SCI	4,180	2,583	12,741	0,147
	CODE	1,982	1,087	8,723	0,082
	GIB	2,720	1,245	9,840	0,070
9	SCI	4,449	2,435	14,422	0,161
	CODE	2,037	1,456	9,971	0,019
	GIB	2,751	1,766	12,803	0,095
108	SCI	4,391	3,518	18,207	0,111
	CODE	1,731	1,035	8,466	0,041
	GIB	3,420	1,985	11,377	0,076
109	SCI	2,438	1,570	9,185	0,137
	CODE	1,683	1,118	8,523	0,077
	GIB	2,653	2,035	32,119	0,080
110	SCI	4,133	2,811	14,059	0,006
	CODE	1,821	1,229	10,228	0,081
	GIB	2,224	1,980	21,928	0,092
111	SCI	4,348	2,647	12,978	0,109
	CODE	1,835	1,014	8,533	0,070
	GIB	2,076	1,786	24,749	0,087
198	SCI	3,454	2,008	10,833	0,087
	CODE	1,871	1,118	8,209	0,072
	GIB	2,007	2,536	42,297	0,090
199	SCI	3,898	2,802	13,014	0,088
	CODE	2,024	1,222	7,000	0,116
	GIB	2,049	1,216	11,314	0,041
200	SCI	4,011	2,749	13,566	0,083
	CODE	1,903	1,089	6,922	0,058
	GIB	1,867	1,199	20,214	0,020
201	SCI	3,704	2,234	11,510	0,044
	CODE	1,772	1,057	6,359	0,021
	GIB	1,845	1,553	23,010	0,057
202	SCI	4,059	2,697	14,878	0,082
	CODE	1,906	1,168	7,129	0,137
	GIB	2,142	1,676	30,915	0,030

Através da análise das Tabelas 2 e 3 nota-se uma melhora significativa do posicionamento tridimensional do GPS através da correção pelo CODE e GIB, tanto em termos de acurácia quando em termos de dispersão em torno da média. No geral, nos dias de alta atividade solar o CODE apresentou melhor resultado do que o GIB, onde o erro médio quadrático do posicionamento apresentou menores valores com a correção do CODE, este comportamento se repetiu na maioria dos dias analisados. No período de baixa atividade a correção foi ainda mais expressiva utilizando ambos modelos,

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, Claudinei Rodrigues. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod\_Ion)**: Implementação em Tempo Real. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

destacando-se o GIB que apresentou resultados ainda mais próximos aos do CODE, superando-o em alguns dias. Observa-se ainda na Tabela 2, que no dia 194 o GIB chegou a apresentar uma discrepância máxima muito elevada muito elevada, fato esse que será investigado para detectar a causa da instabilidade no processamento dos dados.

## 4. CONCLUSÕES

A aplicação de modelos como o GIB para a correção do erro devido à ionosfera no sinal de GNSS possibilita uma maior precisão no posicionamento, principalmente em receptores de simples frequência, sendo estes cada vez mais utilizados para aplicações civis.

Através da análise dos resultados, observou-se que o GIB apresentou um bom desempenho para a correção dos sinais, tanto em termos de acurácia quanto de dispersão em torno da média, sendo mais expressivo em períodos de baixa atividade, sofrendo algumas interferências aleatórias por conta do efeito de cintilação ionosférica em períodos pós pôr do sol. Logo, o modelo apresentou resultados satisfatórios e promissores.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico) pelo auxílio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa por meio do Edital Universal (Processos 483954/2011-1 e 446642/2014-2). À Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela bolsa de iniciação científica. Ao IBGE pelo fornecimento dos dados GNSS das estações RBMC. Ao IGS, pelo fornecimento dos Mapas Globais da Ionosfera e dados de órbitas dos satélites. E ao Grupo de Pesquisa em Geodésia Espacial da UNESP pela disponibilização do *software online* TReVel.

AGUIAR, Claudinei Rodrigues. **Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS**. 2010. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010.



- AGUIAR, Claudinei Rodrigues. KOZELINSKI, Alessandra. Mapas de TEC IONEX em tempo real gerados pelo modelo GIB (Grade Ionosférica Brasileira). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 8, p. 1569–1585, 2015.
- ALVES, Daniela Barroca Marra; ABREU, Pedro Augusto Giraldez; SOUZA, Jéssica Saldanha. GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **R. bras. Geom.**, v. 1, n. 1, p. 2–7, 2013. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.>>. Acesso em: 07 set. 2017.
- CAMARGO, Paulo Oliveira. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pósgraduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- HARGREAVES, John Keith. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace** – the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. Cambridge: Cambridge Press, 1992. 420 p.
- IBGE. **RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. 2017. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso: 07 setembro 2017.
- JAKOWSKI, Norbert; BÉNIGUEL, Yannick; FRANCESCI, Giordiana; PAJARES, Manuel Hernandez; JACOBSEN, Knut Stanley; STANISLAWSKA, Iwona; TOMASIK, Lukasz; WARNANT, René; WAUTELET, Gilles. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques. **J. Space Weather Space Clim.**, v. 2, A22, 2012.
- MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS. Descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p.
- Nasa's Space Physics Data Facility (SPDF). Nasa's Goddard Space Flight Center. **OMNIWeb Plus data and service**. 2017. Disponível em: <<https://omniweb.gsfc.nasa.>>. Acesso em: 11 set. 2017.
- NASA. **Global Navigation Satellite System (GNSS) International Engagement**. 2012. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/content/>>. Acesso: 30 março 2017.
- NCEI - National Centers of Environmental Information. **The Disturbance Storm Time Index**. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/>>. Acesso em: 12 abr. 2017.
- PROL, Fabricio dos Santos; MARCATO, José; NIEVINSK, Felipe Geremia; GOMES, Ronaldo Lisboa; PARANHOS FILHO, Antonio Conceição. Transformação entre referenciais e cálculo de velocidades através do aplicativo web TREVel. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 3, p. 569–579, 2014.
- ROCHA, Rodrigo Santos Mendes; JEREZ, Gabriel Oliveira; BRASSAROTE, Oliveira Nascimento Brassarote; MONICO, João Francisco Galera. 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. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 251–276, abr/jun. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.>>. Acesso em: 07 set. 2017.
- SWPC - Space Weather Prediction Center. **Planetary K-Index**. 2017a. Disponível em: <<http://www.swpc.noaa.gov/>>. Acesso em: 12 abr. 2017.
- SWPC - Space Weather Prediction Center. **F10.7 cm Radio Emissions**. 2017b. Disponível em: <<http://www.swpc.noaa.gov/>>. Acesso em: 12 abr. 2017.
- TAKASU, Tomoji. **RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning**. ver. 2.4.2. Japan: Tokio. 2013.
- USNO. **GPS System Description**. Disponível em: <<ftp://tycho.usno.navy.mil/>>. Acesso em: 05 abr. 2017.
- VANI, Bruno César; MONICO, João Francisco Galera; SHIMABUKURO, Milton Hirokazu. Fundamentos e Aspectos Computacionais para Posicionamento por Ponto. **R. bras. Geom.**, v. 2, n. 1, p. 8–19, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.>>. Acesso em: 07 set. 2017.



## Quality analysis of the IONEX map generated by the ionospheric GIB model at 24 solar cycle

Thalles Felipe Kovalczuk Ribeiro<sup>5</sup> Vitória Narita Dantas<sup>6</sup> Carlos Eduardo Messias Godoi<sup>7</sup> Claudinei Rodrigues de Aguiar<sup>8</sup>

20 novembro 2017

**Abstract** – The Global Navigation Satellite System (GNSS) is increasingly used in various applications such as agriculture, air, sea and land navigation, among others. However, this system signals are affected by several errors sources, mainly from the terrestrial ionosphere layer, highlighting the effect of ionospheric refraction. This error, coming from the ionosphere, it can be minimized through the adoption of mathematical models that seek to describe the ionosphere, such as the GIB (Brazilian Ionospheric Grid). This work aimed to analyze the efficiency of the GIB and to compare it with the CODE (Center for Orbit Determination in Europe) model in various situations of ionospheric behavior. The results were satisfactory showing an improvement in the accuracy and standard deviation of the corrected coordinates.

**Keywords:** IONEX. Ionospheric grid. GNSS

### **Correspondência:**

Claudinei Rodrigues de Aguiar

Rua Marcílio Dias, 635, CEP 86812-460, Apucarana, Paraná, Brasil.

Recebido: 17/09/2017

Aprovado: 20/11/2017

**Como citar:** RIBEIRO, Thalles Felipe Kovalczuk et al. Análise da qualidade do mapa ionosférico IONEX gerado pelo modelo ionosférico GIB no ciclo solar 24. *Syn. scy. UTFPR*, Pato Branco, v. 12, n. 1, p. 219–227. 2017. ISSN 2316-4689 (Eletrônico). Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/synscy>>. Acesso em: DD mmm. AAAA.

DOI: “registro apenas quando a revista for depositada no portal do PERI”



Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença **Creative Commons** Atribuição 4.0 Internacional.

<sup>5</sup> thalleskovalczuk@gmail.com, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.

<sup>6</sup> vic\_narita@hotmail.com, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.

<sup>7</sup> carlosgodoi.2016@alunos.utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.

<sup>8</sup> rodriguesaguiar@utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Apucarana, Apucarana, Paraná, Brasil.