

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO GIB (GRADE IONOSFÉRICA BRASILEIRA) POR MEIO DO POSICIONAMENTO POR PONTO GNSS

Alessandra Kozelinski (UTFPR/DAAGR) alekozelinski@hotmail.com
Claudinei Rodrigues de Aguiar (UTFPR/COECI/PPEGC) rodriguesaguiar@utfpr.edu.br

Resumo: Os receptores GNSS são amplamente utilizados em diversas atividades, como monitoramento de estruturas, navegação aérea, marítima e terrestre, geodinâmica, agricultura e muitas outras. Porém, diversos erros podem comprometer a acurácia das coordenadas obtidas, sendo um dos principais os efeitos provocados pela refração ionosférica, que podem ser corrigidos ou minimizados com a adoção de modelos ionosféricos, por exemplo. Assim sendo, este trabalho apresenta a avaliação da eficiência do modelo GIB (Grade Ionosférica Brasileira), por meio da técnica de posicionamento por ponto absoluto. Para isto, o GIB foi utilizado na geração da grade ionosférica sobre o território nacional a partir da assimilação de dados GNSS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS).

Palavras-chave: GNSS, grade ionosférica, GIB, posicionamento por ponto.

QUALITY EVALUATION OF GIB (BRAZILIAN IONOSPHERIC GRID) BY GNSS POINT POSITIONING

Abstract: GNSS receivers are widely used in many activities, such as structures monitoring, air, sea and land navigation, geodynamics, agriculture and others. However, many errors may compromise the accuracy of the coordinates, which one of the majors is the ionospheric refraction effects that be corrected, for instance, by the adoption of ionospheric models. Therefore, this paper evaluates the efficiency of the GIB (Brazilian Ionospheric Grid) model, through of GNSS positioning point method. For this, GIB has used in the generation of ionospheric grid over the Brazilian area from the assimilation of RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS) GNSS data.

Keywords: GNSS, ionospheric grid, GIB, point positioning.

1. INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) é cada vez mais empregado para realizar posicionamentos em que a acurácia, principalmente em receptores de simples frequência, é afetada por erros sistemáticos provocados por interferências nos sinais transmitidos pelos satélites. Uma das principais fontes desses erros sistemáticos é a ionosfera, a qual afeta a propagação dos sinais GNSS, cuja magnitude do erro de primeira ordem depende do Conteúdo Total de Elétrons (TEC) livres nessa camada, degradando principalmente os de posicionamentos a partir de receptores de simples frequência.

O problema principal na modelagem da ionosfera é que essa varia no tempo e espaço, em função de fatores como localização geográfica e ângulo zenital e distância do Sol, entre outros. O Brasil é uma das regiões do planeta mais afetadas, apresentado os maiores gradientes espacial, temporal e valores do TEC e, conseqüentemente, do erro sistemático provocado por esta camada. Desta forma, é fundamental determinar e corrigir esse erro.

Devido à natureza dispersiva da ionosfera, a determinação do erro devido a essa camada é feita utilizando observáveis GNSS, que no caso do GPS (*Global Positioning System*), por exemplo, são as fases das ondas portadoras (L_1 , L_2 e L_5) e as pseudodistâncias (C/A, L2C, P(Y)), coletadas com receptores GNSS de dupla frequência, possibilitando dessa forma a modelagem da ionosfera.

Para corrigir ou minimizar a influência do erro sistemático devido à ionosfera nos procedimentos de posicionamento e navegação com GNSS, várias técnicas e modelos vêm

sendo desenvolvidos (AGUIAR, 2005; AGUIAR, 2010; CAMARGO, 1999; KONNO et al., 2006; SEO, 2010). O modelo elaborado por Aguiar (2010), propõe um método para a geração da grade ionosférica e seu nível de confiança (GIVE – *Grid Ionospheric Vertical Error*), levando em consideração as características da ionosfera na região brasileira (AGUIAR; CAMARGO, 2012). Desse trabalho resultou o modelo ionosférico, denominado GIB (Grade Ionosférica Brasileira), o qual considera as peculiaridades da ionosfera na região brasileira.

Neste sentido, este artigo apresenta uma avaliação da qualidade da grade ionosférica sobre o território brasileiro através da comparação do posicionamento obtido com as observáveis corrigidas pelo GIB e o posicionamento obtido sem a correção dos efeitos ionosféricos.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Sinais transmitidos pelos satélites GPS

O GPS é o sistema GNSS com maior número de usuários. Desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD), seu funcionamento tem como base a medida da distância entre o receptor do usuário e pelo menos 4 satélites (MONICO, 2008).

Os satélites do GPS transmitem sinais (L_1 , L_2 e L_5), denominados de fase da onda portadora, nos quais são modelados os códigos (C/A, L1C, L2C, L5, P(Y) e M (Militar)) e as mensagens de navegação (Figura 1).

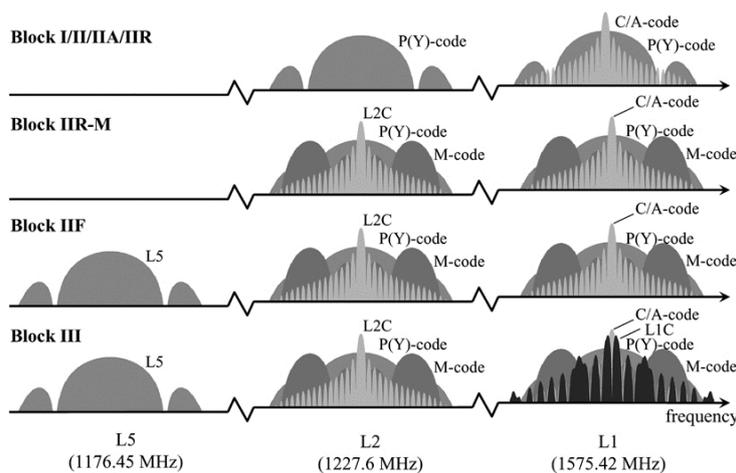


Figura 1 – Sinais do GPS. Fonte: Hegarty e Chatre (2008).

As três ondas portadoras, L_1 , L_2 e L_5 , são transmitidas nas respectivas frequências e comprimentos de onda (λ):

$$L_1 = 1575,42 \text{ MHz e } \lambda \approx 19 \text{ cm}$$

$$L_2 = 1227,60 \text{ MHz e } \lambda \approx 24 \text{ cm}$$

$$L_5 = 1176,45 \text{ MHz e } \lambda \approx 25,5 \text{ cm}$$

Os códigos C/A e P(Y) são transmitidos desde o início do sistema, marcado pelos satélites do Bloco I. Todos os satélites dos Blocos I e II já não estão em operação. A partir do início da modernização do sistema, marcada com o lançamento dos satélites do Bloco IIR-M, passaram a ser transmitidos os códigos L2C (na portadora L_2) e M (em L_1 e L_2). Na segunda fase da modernização, o sinal L_5 e o código L5 passaram a ser transmitidos pelos satélites do Bloco IIF. Os satélites do Bloco III (GPS III), previstos para serem lançados a partir de 2016, também transmitirão o código civil L1C na portadora L_1 . A Tabela 1 apresenta um resumo da situação atual da constelação de satélites GPS operacionais.

Tabela 1 – Resumo dos blocos de satélites GPS.

Bloco	Qtd. de Satélites	PRN	Período de Lançamento
IIA	3	4, 10, 32	1990-1997
IIR	12	2, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 28	1997-2004
IIR-M	7	5, 7, 12, 15, 17, 29, 31	2005-2009
IIF	9	1, 3, 6, 9, 24, 25, 26, 27, 30	desde 2010 (previstos 3 lançamentos até janeiro de 2016)
GPS III	-	-	Início em 2016

2.2 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) (Figura 2), sob responsabilidade do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) está em operação desde 1996 com o objetivo de proporcionar dados precisos de estações GNSS ativas com coordenadas conhecidas, pertencentes ao SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) (IBGE, 2011). Atualmente, a RBMC é composta por 118 estações implantadas e homologadas (IBGE, 2015).



Figura 2 – Estações da RBMC. Fonte IBGE (2015)

As estações de referência pertencentes à RBMC estão materializadas em pilares estáveis com bases de centragem forçada e estão equipadas com antenas geodésicas e receptores GNSS de alto desempenho conectados à internet. Os dados coletados pelos receptores são organizados em arquivos diários e então enviados ao Centro de Controle da RBMC – Kátia Duarte Pereira, na Coordenação de Geodésia, localizada no Rio de Janeiro – RJ, onde são processados e formatados no padrão RINEX (*Receiver Independent EXchange format*) e compactados para download no portal do IBGE (IBGE, 2015).

Em 2009, algumas estações da RBMC com tecnologia NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) passaram a disponibilizar as observáveis GNSS em tempo real. Esse serviço é denominado de RBMC-IP e, atualmente, conta com 92 estações de referência disponibilizando dados continuamente em tempo real (Figura 2).

Todas as estações da RBMC compõem também a rede de referência SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) e algumas contribuem com o IGS (International GNSS Service) (Figura 3).

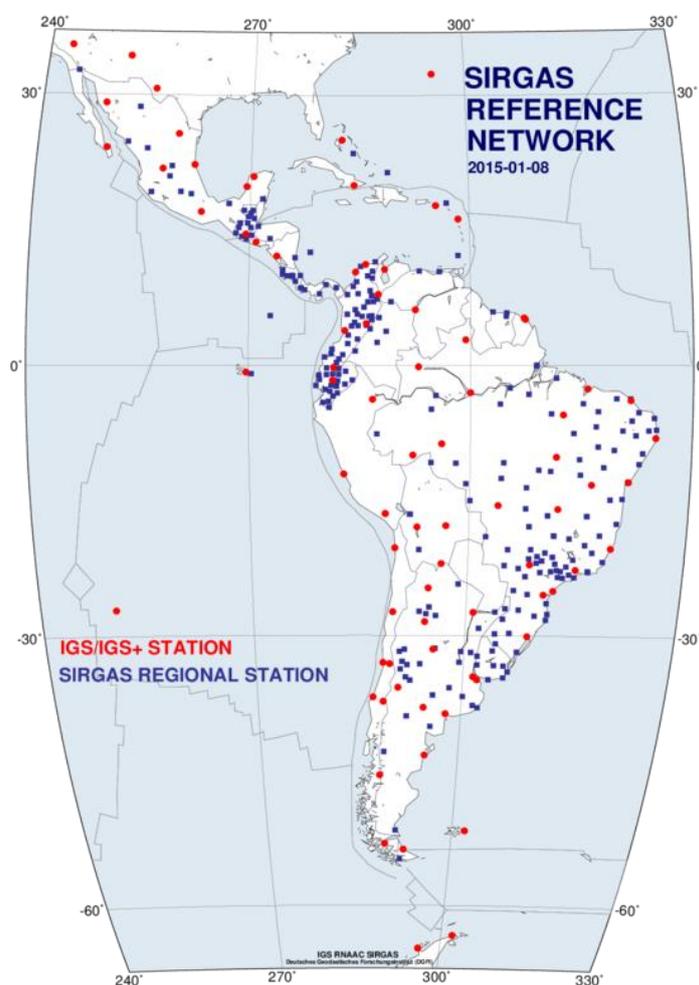


Figura 3 – Rede SIRGAS e estações IGS. Fonte: www.sirgas.org.

2.4 Efeitos da Ionosfera nos sinais GNSS

Para efeitos de análise da propagação de ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre pode ser dividida em duas camadas: troposfera e ionosfera. Sendo a segunda responsável pelas maiores interferências na acurácia dos posicionamentos e objeto de estudo deste trabalho.

A ionosfera é a camada superior que constitui a atmosfera terrestre localizada entre, aproximadamente, 50 e 1000 km de altitude e é caracterizada por apresentar uma alta densidade de elétrons livres capazes de afetar a propagação das ondas de rádio transmitidas pelos satélites GNSS. Os principais efeitos sofridos pelos sinais GNSS quando atravessam este meio são o de atraso do grupo na modulação e o avanço na fase portadora, o que provoca uma diminuição e um aumento na distância medida pela fase e pelo código, respectivamente (SEEBER, 2003; STOLLE et al., 2003; AGUIAR, 2010).

Um dos parâmetros mais importantes usados na caracterização desse meio é o índice de refração ionosférica (HARGREAVES, 1992). A partir do índice de refração obtém-se o erro sistemáticos devido à ionosfera para a fase da portadora (I_f) e para os sinais modulados pelo código (I_g) (KOMJATHY, 1997):

$$I_f = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \quad (1)$$

$$I_g = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}. \quad (2)$$

onde, f é a frequência do sinal em Hz. Pelas equações 1 e 2 verifica-se que o erro devido à ionosfera é proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera. Nota-se, ainda, que a magnitude do erro na distância é igual para as medidas de pseudodistância e fase, mas com sinais opostos.

O TEC varia no tempo e no espaço e é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo das manchas solares, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética (HARGREAVES, 1992). O Brasil é uma das regiões do globo que apresentam os maiores valores do TEC, além de alta variação espacial e temporal se comparados com valores referentes às outras regiões do planeta (FEDRIZZI, 2003; MATSUOKA, 2007; WEBSTER, 1993).

Outra consequência dos efeitos da ionosfera sobre os sinais GNSS é a cintilação ionosférica, que se caracteriza por rápidas variações aleatórias na fase e na amplitude do sinal, as quais são causadas por irregularidades existentes na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera (CONKER et al., 2000). No Brasil, as ocorrências de cintilações são mínimas de abril até agosto, durante o outono e inverno, e máximas de setembro a março, durante a primavera e o verão (AGUIAR, 2005).

Uma alternativa para os usuários do GNSS é a utilização de modelos ionosféricos para a correção do erro sistemático devido à ionosfera sobre as observáveis medidas. Atualmente têm-se à disposição vários modelos, dentre os quais pode-se citar os modelos empíricos cujos os mais utilizados e pesquisados são o modelo climatológico IRI (*International Reference Ionosphere*) (BILITZA, 1990) e o modelo teórico PIM (*Parameterized Ionospheric Model*) (DANIELL et al., 1995). Dentro da comunidade de usuários do GNSS, o modelo empírico mais utilizado é o modelo *Broadcast* (KLOBUCHAR, 1987), também conhecido como modelo de Klobuchar, cujos coeficientes são transmitidos nas mensagens de navegação.

Em uma análise do modelo *Broadcast*, Aguiar et al. (2003) realizaram experimentos para avaliar a eficiência da correção do atraso ionosférico na medida da pseudodistância entre

o satélite e o receptor na região Brasileira. Nestes experimentos, foi observado que o modelo *Broadcast* corrige algo em torno de 50 a 60% do erro ionosférico.

Outra possibilidade para os usuários do GNSS é a utilização de mapas ionosféricos para aplicar as correções sobre as observáveis. Em termos de mapas ionosféricos, pode-se citar aqueles produzidos pelo Centros de Análise da Ionosfera do SIRGAS, que produzem mapas horários do VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção Vertical) para a sua região de cobertura. Os mapas mais utilizados globalmente são os Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionosphere Map*) gerados pelo IGS por meio de quatro centros de análise que produzem estimativas do GIM no formato IONEX (*IONosphere map EXchange*).

Com o intuito de modelar melhor as peculiaridades da ionosfera na região brasileira, no Brasil, foi desenvolvido por Camargo (1999), na Universidade Estadual Paulista (UNESP), um modelo regional da ionosfera denominado Mod_Ion que utiliza dados GPS das estações da RBMC.

Com a necessidade de se desenvolver métodos capazes de fornecer correções ionosféricas, com estruturas simples e em tempo real e também com surgimento dos sistemas de apoio à navegação, passou-se a fornecer informações de correções do erro da ionosfera utilizando uma estrutura de grade regular de pontos, as grades ionosféricas (GI). Assim sendo, Aguiar (2010) propõe um método para a geração da grade ionosférica e seu nível de confiança (GIVE – *Grid Ionospheric Vertical Error*), desenvolvendo o modelo denominado Grade Ionosférica Brasileira (GIB), o qual foi implementado em ambiente computacional, resultando no software GIB, que opera em tempo real ou em pós-processamento levando em consideração as características da ionosfera na região brasileira (AGUIAR; CAMARGO, 2012; AGUIAR, 2010). Nesse trabalho será utilizado o software do GIB para a avaliação do modelo ionosférico nele implementado. Mais detalhes sobre o GIB pode ser encontrado em Aguiar (2010).

3. MATERIAS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas as observáveis GPS da RBMC disponibilizadas pela Coordenação de Geodésia do IBGE. Foram utilizadas as órbitas dos satélites contidas nas efemérides precisas, disponibilizadas pelo IGS no endereço <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/>. Esses dados são necessários para o processamento no software GIB, que gera a grade ionosférica e corrige os efeitos da ionosfera sobre a estação de interesse.

No experimento o GIB foi avaliado para os dias 21 e 24 de janeiro de 2014, período de alta atividade solar dentro do ciclo solar 24 (Figura 4) e também são dias classificados como geomagneticamente calmos. Aqui o objetivo é avaliar o GIB em dias sem atividade ionosféricas extremas, como por exemplo as tempestades ionosféricas.

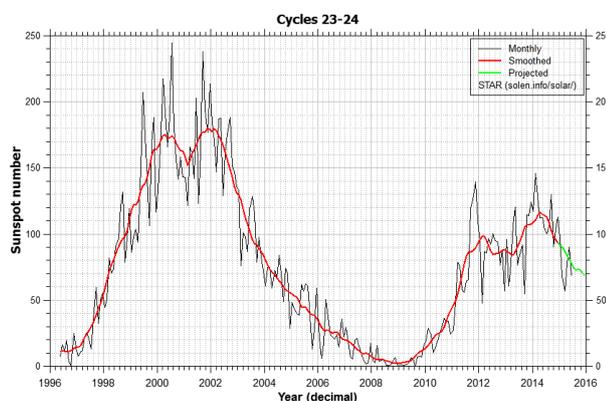


Figura 4 – Ciclo solar 23 e 24. Fonte: <http://solen.info/solar>.

No total foram utilizadas 97 estações para a assimilação dos dados no GIB e geração da grade ionosférica virtual. A estação PPTE, localizada em Presidente Prudente-SP, não participou do processamento dos dados, pois devido a sua latitude geomagnética, esta foi escolhida para simular o receptor do usuário e realizar a análise da qualidade das correções fornecidas pelo GIB.

Assim, aplicando o método de posicionamento por ponto absoluto, foram calculadas as coordenadas X, Y e Z da estação PPTE, utilizando-se do software RTKLIB 2.4.2 (TAKASU, 2013), distribuído sob a licença BSD 2-Clause.

Para analisar a qualidade das correções a partir da grade ionosférica, no posicionamento por ponto utilizaram-se os arquivos RINEX da PPTE sem a correção da ionosfera (SCI) e com a correção da ionosfera (CCI) fornecida pelo GIB. Assim, obtiveram-se as coordenadas X, Y e Z da PPTE corrigidas do efeito da ionosfera e sem a correção do efeito ionosférico, para a comparação com as coordenadas conhecidas da referida estação.

Como o GIB permite a correção em tempo real, neste caso, apesar de se utilizar o pós processamento, as correções foram aplicadas a cada instante de observação. Desta forma as coordenadas cartesianas foram calculadas a cada 30 segundos, correspondente ao intervalo de observação adotado. As discrepâncias (D_X , D_Y e D_Z) foram calculadas por:

$$\begin{aligned} D_X &= X_{\text{calc}} - X_{\text{referência}} \\ D_Y &= Y_{\text{calc}} - Y_{\text{referência}} \\ D_Z &= Z_{\text{calc}} - Z_{\text{referência}} \end{aligned} \quad (3)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mencionado, a avaliação do GIB se deu pela análise da discrepância calculada para coordenadas X, Y e Z com a correção da ionosfera (CCI) e sem a correção da ionosfera (SCI). A Figura 5 apresenta a visualização gráfica das discrepâncias CCI e SCI para os dois dias analisados.

Ao analisar os gráficos da Figura 5, observa-se que as discrepâncias entre as coordenadas calculadas e as verdadeiras são menores em todas as componentes (D_X , D_Y e D_Z), para ambos os dias analisados, quando se aplicam as correções do atraso ionosférico fornecidas pelo modelo GIB.

Nos gráficos, principalmente, para as componentes D_X e D_Y observa-se valores maiores de discrepâncias nas primeiras horas de processamento. Isso se deve ao fato do GIB estar em fase inicial de estimação dos parâmetros do modelo de geração da grade ionosférica. Como o GIB utiliza o filtro de Kalman, o modelo estocástico e os parâmetros estimados tornam-se mais estáveis com o passar do tempo.

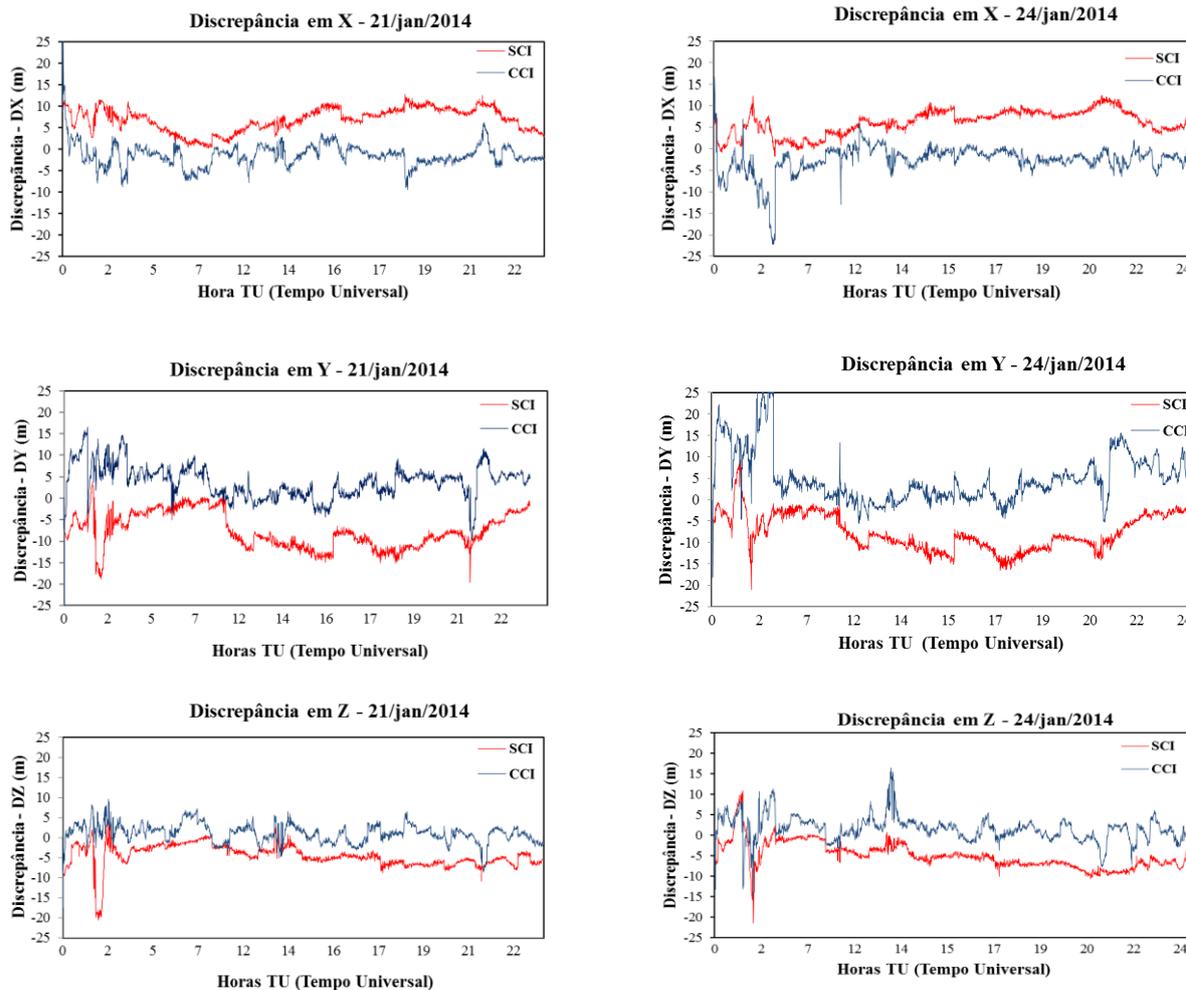


Figura 5 – Discrepâncias das coordenadas cartesianas sem (SCI) e com (CCI) as correções da ionosfera.

As Tabelas 1 e 2 mostram a discrepância média e os respectivos desvios-padrão para os dias 21 e 24, com (CCI) e sem (SCI) correção da ionosfera, respectivamente.

Tabela 1 – Discrepância média e desvio padrão com aplicação das correções para efeitos ionosféricos.

Dia	Discrepância Média			Resultante (D_{XYZ}) (m)	Desvio Padrão			Resultante (σ_{DXYZ}) (m)
	D_X (m)	D_Y (m)	D_Z (m)		σ_{DX} (m)	σ_{DY} (m)	σ_{DZ} (m)	
21/01 – CCI	-1,391	3,758	1,062	4,145	1,891	2,979	1,789	3,956
24/01 – CCI	-2,753	4,823	1,553	5,766	2,147	4,368	2,158	5,324

Tabela 2 – Discrepância média e desvio padrão sem aplicação das correções para efeitos ionosféricos.

Dia	Discrepância Média			Resultante (D_{XYZ}) (m)	Desvio Padrão			Resultante (σ_{DXYZ}) (m)
	D_X (m)	D_Y (m)	D_Z (m)		σ_{DX} (m)	σ_{DY} (m)	σ_{DZ} (m)	
21/01 – SCI	6,144	-6,800	-4,183	10,074	2,825	3,559	2,059	4,988
24/01 – SCI	5,529	-6,822	-4,314	9,783	2,554	3,284	2,468	4,837

As tabelas apresentam as médias das discrepâncias para cada componente (D_X , D_Y e D_Z) e os respectivos desvios-padrão (σ_{DX} , σ_{DY} e σ_{DZ}). Para analisar os resultados em termos de posicionamento tridimensional, as colunas 5ª e 9ª das Tabelas 1 e 2 apresentam os valores para a resultante.

Para analisar a acurácia do posicionamento, adotou-se o conceito apresentado em Monico et al. (2009), onde a acurácia (a) pode ser definida pela tendência (b) associada à precisão (σ_X), ou seja $a = b \pm \sigma_X$.

Neste trabalho a tendência é dada pela discrepância calculada. Comparando-se as Tabelas 1 e 2 observa-se que em todos os casos as discrepâncias (tendências) reduzem com o processamento CCI. Em termos de resultante as discrepâncias para os dias 21 e 24 reduziram, respectivamente, de 10,074 m e 9,783 m para 4,145 m e 5,766.

Observa-se também que a dispersão das discrepâncias também reduziu após a correção da atraso ionosférico, exceto para a componente D_Y do dia 24. Pelas tabelas verifica-se que o desvio-padrão médio para D_Y , no dia 24, passou de 3,284 m (SCI) para 4,368 m (CCI). Analisando essa componente no gráfico apresentado na Figura 5, pode-se observar que a mesma apresentou variações significativas (chegando a ~25 m) nas primeiras horas de processamento com as correções ionosféricas (CCI). A causa desse tipo de degradação nas horas iniciais de processamento já está sendo objeto de estudo.

Para ser ter uma ideia da melhora proporcionada pelo GIB no posicionamento, a Tabela 3 apresenta a magnitude dessa melhora em termos de porcentagem.

Tabela 3 – Melhora média proporcionada pelas correções dos efeitos ionosféricos.

Dia	Melhora na Discrepância Média				Melhora no Desvio Padrão			
	D_X (%)	D_Y (%)	D_Z (%)	Resultante (D_{XYZ}) (%)	σ_{DX} (%)	σ_{DY} (%)	σ_{DZ} (%)	Resultante (σ_{DXYZ}) (%)
21/01	77,36	44,74	74,61	58,85	33,06	16,30	13,11	20,70
24/01	50,21	29,30	64,00	41,06	15,94	-33,01	12,56	-10,07

Pela Tabela 3, observa-se que na resultante a acurácia melhorou em 58,85% e 41,06%, respectivamente, para os dias 21 e 24. Observa-se ainda que a coordenada X, no dia 21, foi a componente que apresentou a melhor correção média, chegando a 77,36%. De modo geral, observando as tabelas 1, 2 e 3 pode-se verificar que a aplicação das correções ionosféricas fornecidas pelo GIB proporcionou um aumento na acurácia do posicionamento por ponto simples.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de modelos ionosféricos para a correção do erro devido à ionosfera nas observáveis GNSS, possibilita a obtenção de resultados mais acurados nas determinações das coordenadas, principalmente nos levantamentos realizados com receptores de simples frequência.

Deve-se salientar que a utilização das correções do modelo GIB apresentaram melhora na acurácia do posicionamento, obtendo-se uma melhora média de até 77,36%. O modelo ionosférico avaliado apresentou resultados satisfatórios e promissores.

Com o aumento do número de estações de referência distribuídas em território nacional os resultados a serem obtidos com o GIB tendem a melhorar.

Atualmente o GIB está em fase de avaliação e validação da qualidade das correções fornecidas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio à pesquisa (Processo: 446642/2014-2). Também agradem ao IBGE/CGED pela disponibilização dos dados GNSS da RBMC.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. R. *Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS*. 2010. 256 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

AGUIAR, C. R. *Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): Implementação em Tempo Real*. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. *Resolução espacial da grade ionosférica e do GIVE, Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, jul-set 2012, Artigos, v. 18, nº3, p.464-479. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bcg/v18n3/07.pdf>>. Acesso em 15 out. 2014.*

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P.O.; MATSUOKA, M.T.; DAL POZ, W.R. *Determinação do Erro Sistemático na Pseudodistância devida à Ionosfera: avaliação da performance do Mod_Ion e do modelo de Klobuchar. Série em Ciências Geodésicas. UFPR, Curitiba, Paraná, vol.3, pp. 119-132. 2003.*

BILITZA, D. *International Reference Ionosphere 1990, 1990. 155 f. Relatório NSSDC/WDC-A-R&S 90-22, National Space Science Data Center/World Data Center A for Rockets and Satellites, Greenbelt, Maryland, 1990.*

CAMARGO, P. O. *Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores gps de uma frequência*. 1999. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Y. *Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/SBAS Availability. Virginia: The MITRE Corporation, 2000. 63p.*

DANIELL, R. E. Jr.; BROWN, L. D.; ANDERSON, D. N.; FOX, M. W.; DOHERTY, P. H.; DECKER, D. T.; SOJKA, J. J.; SCHUNK, R. W. *Parameterized ionospheric model: A global ionospheric parameterization based on first principles models, Radio Sci., 30(5), 1499–1510, 1995. doi:10.1029/95RS01826*

FEDRIZZI, M. *Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS*. 2003. 223 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

HARGREAVES, J. K. *The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace – the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere.* Cambridge: Cambridge Press, 1992. 420p.

HEGARTY, C. J.; CHATRE, E. *Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS).* *Proceedings of the IEEE.* v. 96, n. 12. p.1902-1917. 2008. doi: 10.1109/JPROC.2008.2006090.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Online, 2015. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: jul. 2015.*

IBGE. *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – 15 anos – 1996 a 2011. Relatório Técnico.* 46p. 2011.

KLOBUCHAR, J. A. *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users.* *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v.AES-23, n.3, 1987, p.325-331.

KOMJATHY, A. *Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System.* 1997. 248 f. Ph.D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n° 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

KONNO, H.; PULLEN, S.; RIFE, J.; ENGE, P. *Ionosphere Monitoring Methodology for Hybrid Dual-Frequency LAAS.* In: *ION Institute of Navigation Global Navigation Satellite Systems Conference, Fort Worth, TX, sept. 2006.*

MATSUOKA, M. T. *Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira.* 2007. 263p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2007.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS. Descrição, fundamentos e aplicações.* 2ª Edição, São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MONICO, J. F. G.; DAL POZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. *Acurácia e Precisão: revendo os conceitos de forma acurada.* *Boletim de Ciências Geodésicas.* v. 15, n. 3, p.469-483, 2009.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy.* 2 ed. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SEO, J. *Overcoming Ionospheric Scintillation for Worldwide GPS Aviation.* 2010. 136f. Ph.D Dissertation – Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.

STOLLE, C.; RAABE, A.; JACOBI, C.; SHLÜTER, S.; JAKOWSKI, N. *Ionospheric Tomography using GPS-Data from CHAMP-Occultations.* 2003. Disponível em: <www.copernicus.org/EGS/egsga/nice01/programme/abstracts/ai5679.pdf>. Acesso em: 8 out. 2014.

TAKASU, T. *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning.* ver. 2.4.2. Japan: Tokio. 2013.

WEBSTER, I. *A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System.* 1993. M.Sc. Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.