



SISTEMA GLOBAL DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITES (GNSS) APLICADO AO MONITORAMENTO DA IONOSFERA EM TEMPO REAL

Claudinei Rodrigues de Aguiar¹,

RESUMO: Nos últimos anos o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) além de se tornar a principal tecnologia para o posicionamento e navegação, também se firmou como uma importante ferramenta para o monitoramento da atmosfera terrestre, com destaque à troposfera e ionosfera. No Brasil, estudos e pesquisas vêm sendo realizadas sobre o efeito da ionosfera sobre os sinais GNSS na banda L, bem como o potencial desse sistema no monitoramento e, conseqüentemente, sua aplicação no estudo do Clima Espacial e na modelagem da dinâmica da ionosfera. Devido à natureza dispersiva da ionosfera a mesma provoca um erro sistemático nos sinais GNSS. A magnitude deste erro é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Contents*), no caminho que os sinais percorrem entre as antenas do satélite e do receptor, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. Na Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Apucarana, vem sendo desenvolvido um projeto para o monitoramento e modelagem ionosférica em tempo real, a partir de rede de estações de referência equipadas com receptores GNSS NTRIP (*Networked Transport RTCM via Internet Protocol*) de dupla frequência. Neste contexto, pode-se citar as redes GNSS do Estado de São Paulo (Rede GNSS SP) e a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), as quais disponibilizam os dados em tempo real. Um algoritmo baseado no Filtro de Kalman foi desenvolvido para a modelagem da ionosfera em regiões de baixa latitude e estimativa do TEC (*Total Electron Contents*). Nesse algoritmo o atraso ionosférico vertical é modelado por uma série de Fourier bidimensional. Recentemente, também foi desenvolvido um modelo baseado no conceito de grade ionosférica virtual. O modelo desenvolvido de forma pioneira no Brasil é denominado de Grade Ionosférica Brasileira (GIB). Este trabalho apresenta alguns resultados obtidos com o GIB.

PALAVRAS-CHAVE: GNSS; Ionosfera; Tempo Real.

1 INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) vem sendo cada vez mais utilizado em diversos segmentos da comunidade, e definitivamente tornou-se uma importante ferramenta para a comunidade científica. Além das aplicações relacionadas diretamente à obtenção de posições tridimensionais, o GPS (*Global Positioning System*) firmou-se como uma importante ferramenta para o monitoramento de importantes parâmetros da atmosfera, com destaque à troposfera e à ionosfera.

Considerando que os satélites do GNSS transmitem mais que um sinal na banda L, que no caso dos satélites GPS são denominados de L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz) e L5 (1176,45 MHz), e que a ionosfera apresenta característica dispersiva, é possível estimar o TEC (*Total Electron Contents*) no caminho dos sinais transionosféricos utilizando-se de técnicas de combinação das observáveis GPS obtidas com receptores de, no mínimo, dupla frequência.

Nos últimos anos várias pesquisas vêm sendo realizadas para melhorar o desempenho do GNSS em tempo real, bem como a utilização deste para estudos da dinâmica da atmosfera terrestre. Dentre os diversos trabalhos pode-se citar: Blanch, Walter e Enge (2004), Konno et al. (2006), Liu (2004), Seo (2010), entre outros.

No Brasil, desde 2003 vem sendo desenvolvida pesquisa e estudos para a modelagem da ionosfera em tempo real a partir de estações equipadas com receptores GNSS de dupla frequência (AGUIAR, 2005; AGUIAR 2010), considerando as características particulares da ionosfera em baixas latitudes, sob a qual a região brasileira se encontra. É importante salientar que esta região da ionosfera, também conhecida como região equatorial, apresenta características peculiares tais como a anomalia equatorial, bolhas ionosféricas, anomalia do atlântico sul, entre outros

Grande parte do Brasil localiza-se sob a região ionosférica de baixa latitude, também conhecida por região equatorial. Nesta região a ionosfera apresenta características particulares, tais como a anomalia equatorial, a ocorrência de bolhas ionosféricas ou bolhas de plasma, anomalia do atlântico sul, entre outros (DE PAULA et al., 2007; HARGREAVES, 1992), que devem ser consideradas para a modelagem e correção do seu efeito no posicionamento e navegação com GNSS.

¹ Docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Câmpus Apucarana, Coordenação de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil UTFPR – Câmpus Pato Branco, Apucarana/PR. Auxílio Financeiro CNPq (Processo: 446642/2014-2). rodrigues.aguiar@gmail.com.



O desenvolvimento do projeto ao longo dos anos vem sendo baseado no processamento dos dados disponibilizados gratuitamente pela rede GNSS do Estado de São Paulo (Rede GNSS SP), mantida pelo GEGE (Grupo de Estudos em Geodésia Espacial) da UNESP de Presidente Prudente, e da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), mantida pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Apesar do desenvolvimento do modelo em tempo real ter iniciado em 2003, os trabalhos com a utilização de dados em tempo real tornaram-se possíveis somente em dezembro de 2006 com a implantação da primeira estação da Rede GNSS SP a disponibilizar dados via NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*), que hoje conta com 18 estações em operação, homologadas pelo IBGE.

Inicialmente Aguiar (2005) desenvolveu, a partir do modelo para aplicações em pós processamento Mod-Ion (CAMARGO, 1999) e dos estudos realizados por Camargo (2001), um algoritmo baseado no filtro de Kalman para a adaptação do Mod_Ion para aplicações em tempo real. Naquele trabalho, o atraso ionosférico vertical foi modelado pela série de Fourier bidimensional. Além dessa, outras funções foram implementadas para a avaliação da eficiência do modelo e o gradiente temporal do TEC foi modelado pelo processo aleatório de Gauss-Markov. Para o cálculo do TEC absoluto, o algoritmo também faz a estimativa das tendências interfrequências dos satélites e dos receptores, uma componente sistemática que afeta as medidas de TEC e atraso ionosférico obtidas a partir dos receptores GNSS.

Dando continuidade às pesquisas e considerando o estado da arte na modelagem ionosférica Aguiar (2010) desenvolveu um método para gerar uma Grade do Atraso Ionosférico (GAI) e seu nível de confiança (GIVE – *Grid Ionosphere Vertical Error*), a fim de melhorar a acurácia em aplicações de posicionamento e navegação pelo GNSS, além de fornecer uma ferramenta que possa ser utilizada na área de estudos da ionosfera.

Os trabalhos desenvolvidos até o momento resultaram em um aplicativo, denominado GIB (Grade Ionosférica Brasileira), o qual é capaz de gerar a GAI e o GIVE, bem como a visualização gráfica dos resultados (mapas de TEC) em tempo real, a partir do processamento de observações de redes de estações de referência equipadas com receptores GNSS de dupla frequência, que transmitem seus dados em tempo real via protocolo NTRIP.

Neste trabalho foi calculado o TEC em tempo real, a partir de observações das estações da RBMC e da Rede GNSS SP, bem como a geração de mapas de VTEC (Vertical TEC) para a região de cobertura das estações. Deve-se salientar que este é um esforço pioneiro no Brasil e que mesmo antes da disponibilidade de dados em tempo real, o modelo para o processamento destes dados já vinha sendo desenvolvido baseado em simulações.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Redes Ativas GNSS NTRIP

O desenvolvimento da pesquisa é baseado na aquisição e processamento de dados GNSS de redes de referência, no Brasil, que utilizam o protocolo NTRIP para a disseminação das medidas coletadas pelos receptores GNSS de dupla frequência.

Assim, no Brasil, nos últimos 9 anos novas perspectivas surgiram, no que diz respeito a melhorar a qualidade da estimação da posição do usuário durante um procedimento de navegação, bem como no monitoramento da ionosfera em tempo real. Isto devido à pioneira REDE GNSS SP (Projeto FAPESP – n° 2004/03384-5, 2004/09235-1 e 2006/04008-2) e, posteriormente, a RBMC-IP, as quais disponibilizam os dados de suas estações de referência em tempo real, utilizando o protocolo de transporte NTRIP. As estações da RBMC que transmitem dados NTRIP compõem a rede que vem sendo denominada de RBMC-IP.

A distribuição atual das estações da Rede GNSS SP e da RBMC-IP é apresentada nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

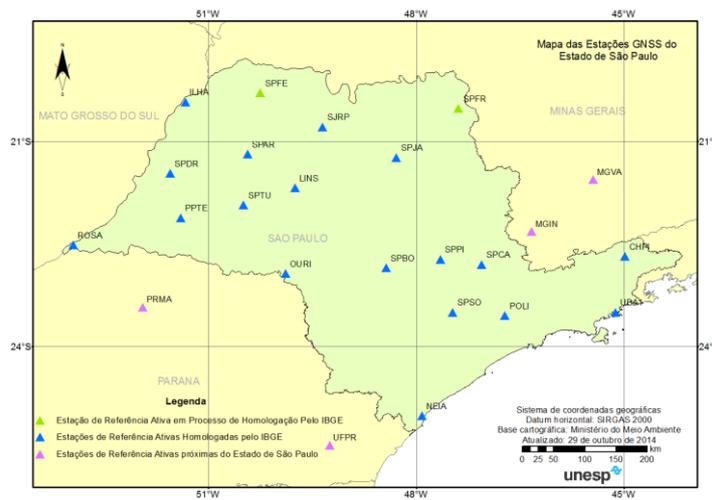


Figura 1 – Distribuição das estações de referência da Rede GNSS SP.
Fonte: gege.fct.unesp.br.



Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Diretoria de Geociências - DGC
Coordenação de Geodésia - CGED

RBMC - SERVIÇO RBMC-IP



Figura 2 – Distribuição das estações de referência da RBMC-IP.
Fonte: <http://www.ibge.gov.br/>.

Para a execução deste trabalho foram utilizadas as estações da RBMC-IP, que atualmente (agosto/2015) conta com 92 estações operacionais. As estações da REDE GNSS SP, que atualmente (agosto/2015) conta com 18 estações homologadas pelo IBGE, também foram utilizadas. Como estas duas redes disponibilizam os dados utilizando o protocolo NTRIP, os processamentos podem ser realizados no modo *off-line* ou *on-line*.



2.2 Cálculo do TEC em Tempo Real

Os valores absolutos do atraso ionosférico são estimados a partir da combinação linear livre da geometria, utilizando-se as observáveis de pseudodistâncias suavizadas pela fase da onda portadora (sP_{1r}^s, sP_{2r}^s), sendo o modelo de observação expresso por (AGUIAR, 2010):

$$I_{rL1}^s = \frac{(sP_2^s - sP_1^s)_r}{\gamma - 1} - c \frac{ds_p^s}{\gamma - 1} - c \frac{dr_p}{\gamma - 1}, \quad (1)$$

onde I_{rL1}^s é o atraso ionosférico na frequência L1, em metros, na direção satélite-receptor. A constante $\gamma = f_{L1}^2 / f_{L2}^2 = (77 / 60)^2$ é obtida a partir das frequências L1-L2 e converte o erro para L2 e c é a velocidade da luz no vácuo. Os termos ds_p^s e dr_p representam a tendência interfrequência L1/L2 dos satélites e receptores, respectivamente. A partir da equação 1 obtém-se o atraso ionosférico absoluto na direção inclinada (satélite-receptor), a qual depende do ângulo de elevação do satélite. As medidas são projetadas na direção vertical utilizando a função de mapeamento (CAMARGO, 1999):

$$I_r^s = \frac{I^v}{\cos(z^s)} \quad e \quad (2)$$

$$\text{sen}(z^s)_r = \frac{r_m}{r_m + h_{\text{ion}}} \text{sen}(z_r^s), \quad (3)$$

onde z' representa o ângulo zenital do caminho do sinal, calculado no ponto em que este atravessa a camada ionosférica a um plano de altitude média h_{ion} , r_m é o raio médio da Terra e h_r é a altura da antena da receptor GNSS da estação de referência. A maioria dos trabalhos utilizam o modelo de fina camada da ionosfera (CAMARGO, 1999), o qual não considera o gradiente espacial da distribuição de elétrons. O GIB considera um modelo de decomposição da camada ionosférica em subcamadas, assim a equação 3 é reescrita como (AGUIAR, 2010):

$$\text{sen}(z_i^s)_r = \frac{r_m + h_r}{r_m + h_i} \text{sen}(z_r^s), \quad (4)$$

onde $i=1, \dots, n$ é o identificador da subcamada e a altitude média da subcamada i é dada por h_i . Na equação 4 observa-se que a altitude geométrica do receptor h_r também é considerada. A figura 3 apresenta as quantidades envolvidas na equação 4.

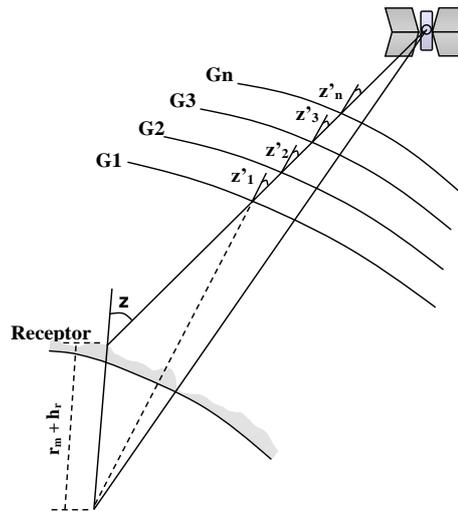


Figura 3 - Geometria para a decomposição do caminho ionosférico.

Fonte: Aguiar (2010).

Para modelar o atraso ionosférico na vertical e estimar as tendências interfrequência, o GIB utiliza a série de Fourier bidimensional. Assim, a equação de observação no filtro de Kalman é dada por (AGUIAR, 2010):

$$\frac{(sP_2 - sP_1)_r^s}{\gamma - 1} = sf(z')_r^s \left\{ \begin{array}{l} a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=4r} [a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)] + a_{n*2+3} h^s + \\ \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+10}}^{m=4r} [a_j \cos(i B^s) + a_{j+1} \sin(i B^s)] \end{array} \right\} + c \frac{ds_p^s}{\gamma - 1} + c \frac{dr_p}{\gamma - 1}, \quad (5)$$

onde, ϕ é a latitude do IPP (*Ionosphere Pierce Point*), θ é a longitude do IPP e a_1, \dots, a_{19} são os coeficientes do modelo ionosférico estimados assumindo um processo estocástico de Gauss-Markov de primeira ordem. Mais detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em Aguiar (2005).

No modelo, como são utilizadas as observáveis GNSS para determinar o efeito ionosférico sobre os sinais, nas equações apresentadas até o momento, os valores de atraso ionosférico são obtidos em metros. Para o monitoramento e estudos do comportamento da ionosfera é interessante quantificar o atraso em termos de densidade de elétrons na ionosfera, assim o atraso vertical I^v pode ser relacionado ao TEC vertical (VTEC) por:

$$I_i^v = \frac{40,3}{f_i^2} \text{VTEC}, \quad (6)$$

onde a frequência f é dada em unidade de Hz e $i = L_1, L_2$.

Considerando o estado na arte, além da modelagem ionosférica utilizando uma função analítica (série de Fourier), no GIB também desenvolvido e implementado o conceito de grade virtual, onde a ionosfera é modelada em forma de pontos regularmente espaçados (IGP – *Ionosphere Grid Points*), bem como é estimado o nível de confiança dessa grade (GIVE) (AGUIAR, 2010).

Numa tentativa de atender as condições de continuidade, disponibilidade e integridade, o modelo proposto no GIB usa um método de interpolação adaptativo, ou seja, a partir do número de IPPs medidos é definida uma função para ajustar uma superfície e então determinar o valor do atraso ionosférico do IGP, bem como do erro do IGP.

Para determinar os IPPs que são utilizados para estimar o atraso ionosférico do IGP, defini-se um raio de busca máximo (R_{\max}) e mínimo (R_{\min}) a partir do IGP (Figura 4). Como o comportamento temporal e espacial da ionosfera na região equatorial apresenta maiores gradientes, neste trabalho o raio de busca inicial R_{\min} não deve ser menor do que 250 km, e o mesmo poderá ser ampliado até um $R_{\max} = 1000$ km.

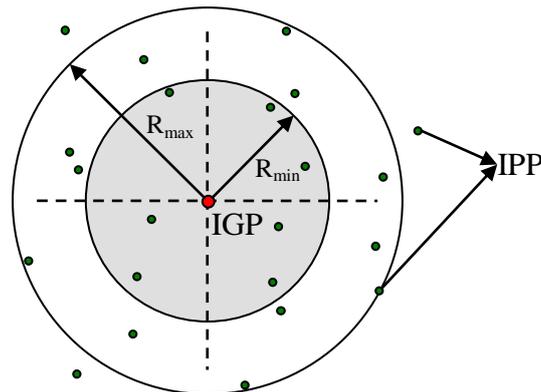


Figura 4 – Variação do raio de busca dos IPPs a serem utilizados na determinação do atraso ionosférico da grade.

Fonte: Aguiar (2010).

O modelo desenvolvido e implementado no GIB está descrito em detalhes em Aguiar (2010).

2.3 Processamento dos Dados em Tempo Real

A RBMC-IP e a Rede-GNSS-SP transmitem os dados em tempo real utilizando o protocolo de transporte NTRIP. Para obtenção destes dados em tempo real pode ser utilizado o aplicativo BNC (*BKG Ntrip Client*). Utilizando o BNC, estes dados são transferidos para o computador, já convertidos em arquivos no formato RINEX. Estes arquivos RINEX, um para cada estação, são dinâmicos, pois possuem seu conteúdo alterado a cada instante em que uma nova observação é disponível pelos receptores das estações de referência que compõem a rede.

Para que o aplicativo GIB processe os dados das estações de referência assim que estes são baixados pelo BNC, foi desenvolvido o ALDAR (Algoritmo de Leitura Dinâmica de Arquivos RINEX) o qual permite que o GIB seja executado em modo *online*. O GIB também utiliza o pacote de rotinas do GMT (*Generic Map Tools*), o qual apresenta licença GNU *General Public License*, para a geração da visualização gráfica dos mapas. A Figura 5 apresenta um resumo do fluxograma do processamento dos dados em tempo real.

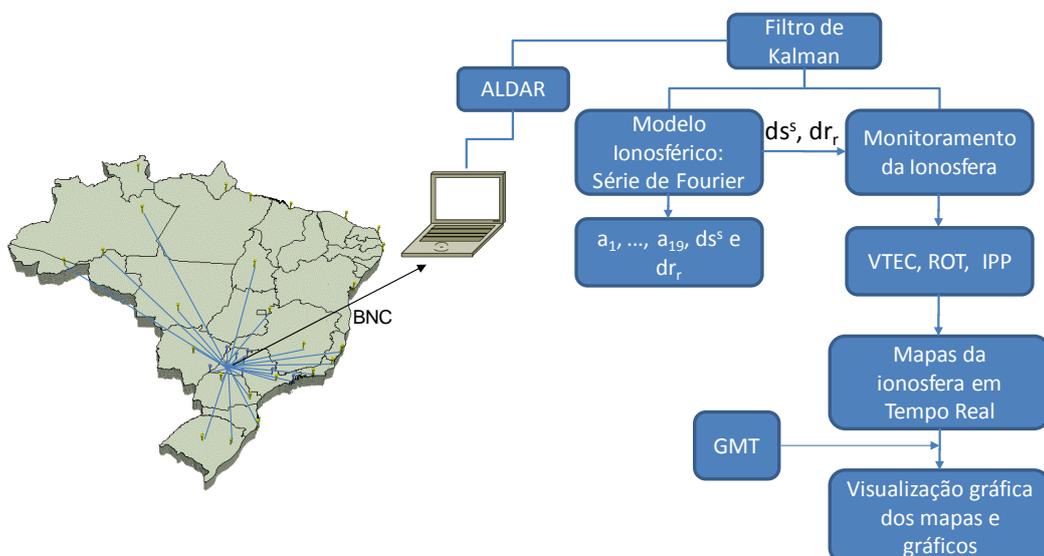


Figura 5 – Fluxograma do processamento dos dados GNSS em tempo real realizado pelo GIB.

Neste trabalho os dados GNSS foram baixados via os servidores do LGE (Laboratório de Geodésia Espacial), da FCT/UNESP, e do IBGE. Os receptores GNSS das redes ativas possuem um aplicativo NTRIP *Caster*, que transmitem os dados para um servidor no IBGE e um servidor no LGE. Estes servidores têm um aplicativo NTRIP *Server* que permite um usuário com o NTRIP *Client*, tal como o BNC, ter acesso aos dados dos receptores em tempo real.



Para cada instante de observação, medidas de atraso ionosférico corrompidas pelas tendências interfrequências são disponíveis para cada combinação satélite/receptor e formam a entrada do filtro de Kalman no módulo Modelo da Ionosfera, do qual a saída consiste nos coeficientes do modelo ionosférico estimados e das tendências interfrequências.

As estimativas dos coeficientes do modelo ionosférico podem ser utilizadas para a correção do atraso ionosférico para usuários de receptores de simples frequência. Já as estimativas das tendências interfrequências são utilizadas no módulo de Monitoramento da Ionosfera, para gerar mapas de VTEC absoluto, entre outras aplicações.

Neste experimento, o processamento *online* foi realizado utilizando os dados GPS das estações de referência que pertencem à Rede GNSS SP e à RBMC-IP. Estes dados foram processados no dia 26 de junho de 2015 (dia do ano: 177). Foram utilizadas as pseudodistâncias suavizadas pela fase da portadora, observadas com uma taxa de 10 segundos e com um ângulo de elevação acima de 30°. As coordenadas das estações de referência são conhecidas e as posições dos satélites são interpoladas utilizando as efemérides ultra-rápidas fornecidas pelo IGS (*International GNSS Service*).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No algoritmo de monitoramento da ionosfera os mapas de VTEC e de ROT podem ser gerados à uma taxa de até 1 segundo. No caso deste experimento, a atualização gráfica dos mapas foi definida para ocorrer em intervalos de 1 minuto. Alguns mapas obtidos do processamento dos dados são apresentados nas Figuras 6 (VTEC) e 7 (ROT – *Rate Of TEC*).

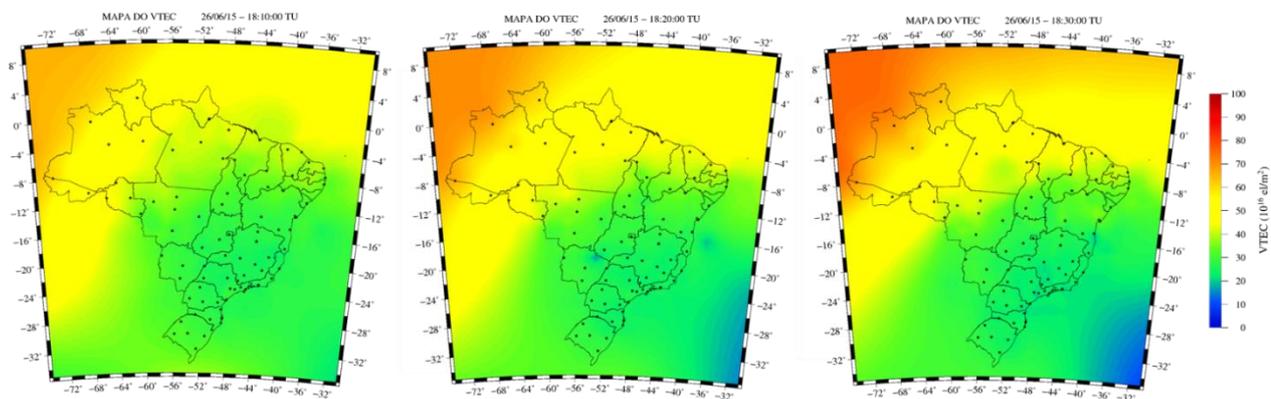


Figura 6 – Exemplos de mapas do TEC na direção vertical (VTEC), gerados para o dia 26/06/2015, com resolução temporal de 10 minutos (18h 10min as 18h 30min TU – Tempo Universal). Os mapas apresentam a distribuição espacial da densidade de elétrons na atmosfera terrestre.

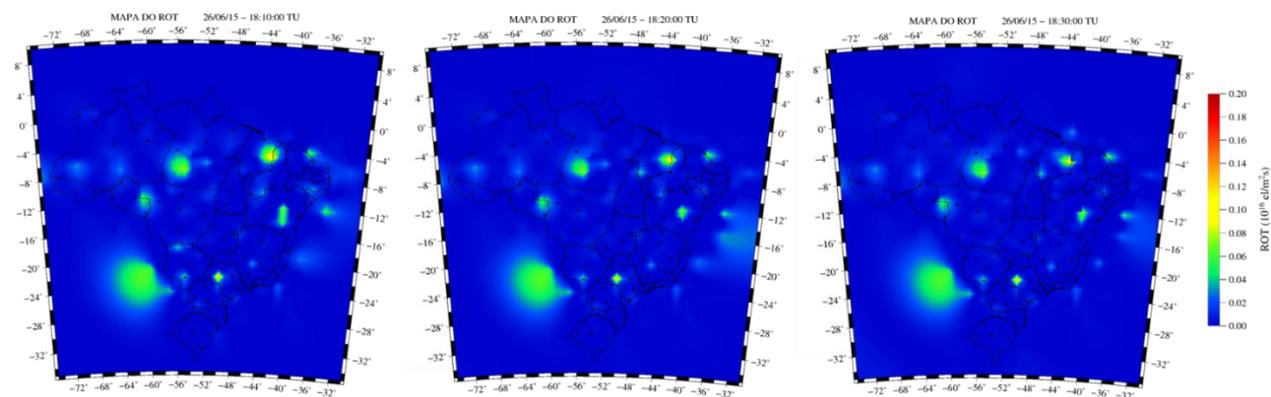


Figura 7 – Exemplos de mapas da variação temporal do TEC (ROT), gerados para o dia 26/06/2015, com resolução temporal de 10 minutos (18h 10min as 18h 30min TU – Tempo Universal). Os mapas apresentam a variação do TEC a cada segundo.

Os resultados apresentados mostram a saída do algoritmo de monitoramento da ionosfera em tempo real. Nos mapas de VTEC é possível realizar análises sobre a distribuição de elétrons na camada ionosférica, enquanto que nos mapas do ROT pode-se verificar a variação temporal TEC.



Além dos mapas gerados em tempo real, o algoritmo também gera a grade do atraso ionosférico (em unidade de metros) e o nível de confiança da grade (GIVE). Exemplos destes mapas podem ser observados na Figura 8 e 9, respectivamente.

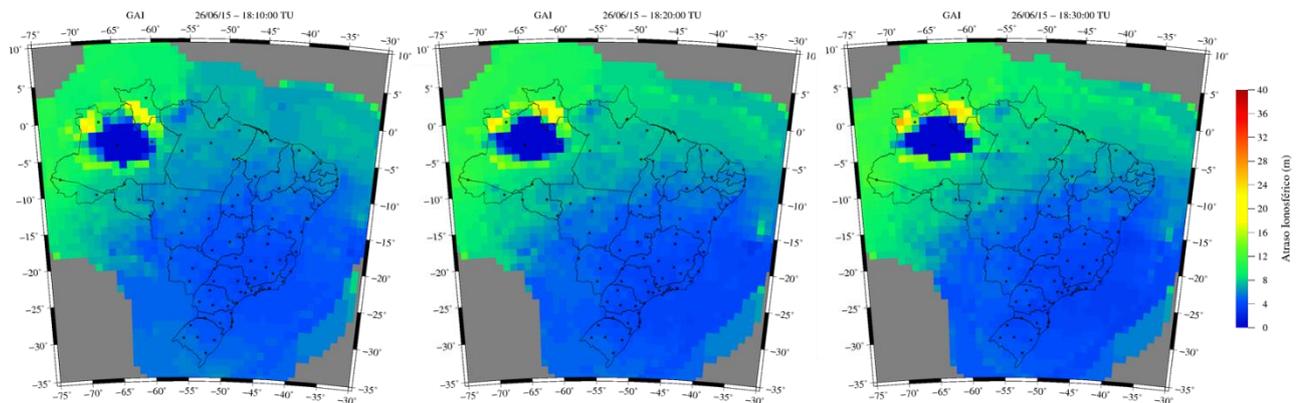


Figura 8 – Exemplos de mapas do atraso ionosférico em grade (GAI) com resolução espacial de 1° em latitude e 1° em longitude, gerados para o dia 26/06/2015, com resolução temporal de 10 minutos (18h 10min as 18h 30min TU – Tempo Universal). Os mapas apresentam a distribuição espacial da magnitude do atraso ionosférico provocado pelo TEC na atmosfera terrestre, em unidade de metros.

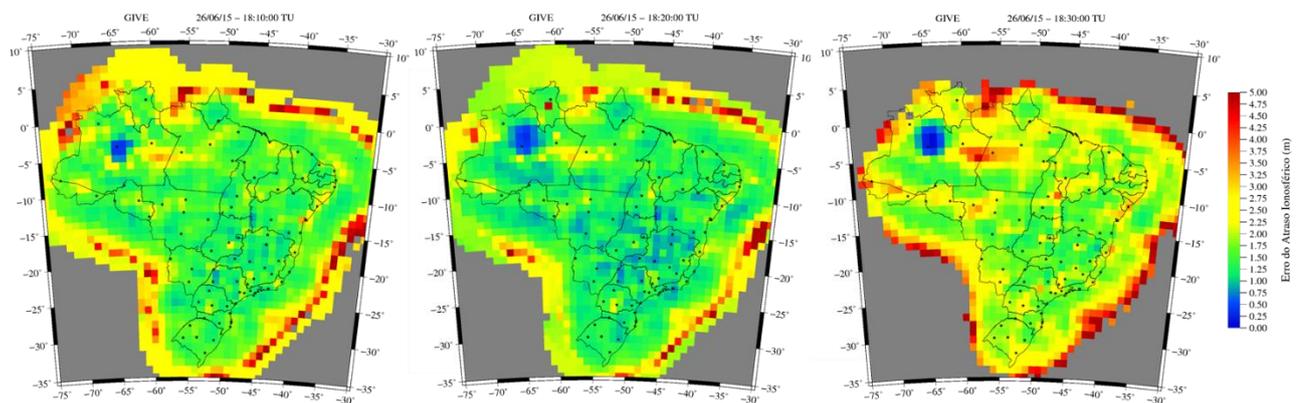


Figura 9 – Exemplos de mapas do erro (nível de confiança) da grade do atraso ionosférico (GIVE) com resolução espacial de 1° em latitude e 1° em longitude, gerados para o dia 26/06/2015, com resolução temporal de 10 minutos (18h 10min as 18h 30min TU – Tempo Universal). Os mapas apresentam a distribuição espacial do erro dos valores de atraso ionosférico fornecido pela grade (GAI), em unidade de metros.

As Figuras 8 e 9 mostram os resultados obtidos aplicando o conceito de modelagem em grade, utilizando uma resolução espacial de 1° em latitude e 1° em longitude. Nessas figuras observa-se também que o conceito de grade é afetado pela disponibilidade temporal das estações. Este fato é observado na região norte, sobre a estação de Manaus-AM. No exemplo apresentado nas figuras mostram o instante em que a estação perdeu conexão com a internet e os seus dados não foram assimilados pelo algoritmo. Este tipo de problema está sendo objeto de estudo.

Como pode-se observar o estudo de caso foi a região brasileira, devido ao fácil acesso aos dados das estações GNSS de referência em tempo real. Em estudos futuros pretende-se ampliar o monitoramento para toda a América do Sul e em seguida realizar o monitoramento global, desde que se tenha acesso aos dados em tempo real.

4 CONCLUSÃO

No Brasil, nos últimos anos novas perspectivas surgiram, no que diz respeito a melhorar a qualidade da estimação da posição do usuário durante um procedimento de navegação, bem como no monitoramento da ionosfera em tempo real. Isto devido à pioneira REDE GNSS SP e, posteriormente, a RBMC-IP, as quais disponibilizam os dados de suas estações de referência em tempo real, utilizando o protocolo de transporte NTRIP.

Neste contexto, o GIB é o primeiro modelo brasileiro desenvolvido para gerar grade ionosférica e GIVE em tempo real. O trabalho apresentou os dados que são gerados pelo GIB. Esse modelo utiliza os dados GNSS



NTRIP de receptores de dupla frequência para o cálculo do atraso ionosférico e do TEC. O atraso ionosférico é uma informação importante para que os usuários dos receptores GNSS de simples frequência possam corrigir os efeitos ionosféricos sobre as observáveis e, conseqüentemente, melhorar a qualidade do posicionamento e navegação com esses tipos de receptores. Por outro lado, o TEC é um parâmetro importante para as áreas que estudam e monitoram o comportamento da ionosfera, tal como a Aeronomia, a Geofísica Espacial e os estudos do Clima Espacial.

Das análises realizadas conclui-se que o GIB tem grande potencial de uso tanto para aplicações de posicionamento e navegação GNSS, quanto para estudos da ionosfera. Conclui-se também que a eficiência das correções do atraso ionosférico é fortemente afetada pela distribuição e pelo número das estações de referência utilizadas na geração da GAI, fato este que tem impacto direto no GIVE. Além disto, a acurácia destas correções também é afetada pela tendência interfrequência dos satélites e receptores. Fatores como disponibilidade, continuidade, integridade e acurácia da GAI também afetam significativamente a qualidade do posicionamento e navegação do usuário.

AGRADECIMENTOS

O autor deste trabalho agradece a Diretoria de Geodésia do IBGE e ao LGE/FCT-UNESP por disponibilizar os dados GNSS da RBMC e da REDE GNSS SP, respectivamente. O autor também agradece ao CNPq pelo auxílio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa por meio do Edital Universal (Processos 483954/2011-1 e 446642/2014-2).

REFERÊNCIAS

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. **Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS**. 2010. 256 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

BLANCH, J.; WALTER, T.; ENGE, P. A New Ionospheric Estimation Algorithm for SBAS Combining Kriging and Tomography. In: **Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting**, San Diego, California. 2004.

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência**. 1999. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CAMARGO, P.O.. **Aplicação do Filtro de Kalman na estimação dos parâmetros de modelo da ionosfera**. 2001, 56p. Relatório trienal de pesquisa desenvolvida em Regime de Dedicção Integral à Docência e à Pesquisa (RDID), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DE PAULA, E. R.; KHERANI, E. A. ; ABDU, M. A. ; BATISTA, I. S. ; SOBRAL, J. H. A. ; KANTOR, I. J. ; TAKAHASHI, H. ; REZENDE, L F C de ; MUELLA, M T A H ; RODRIGUES, F. S. ; KINTNER, P. M. ; LEDVINA, B. M. ; MITCHELL, C. ; GROVES, K M . Characteristics of the ionospheric F-region plasma instabilities over Brazilian longitudinal sector. **Indian Journal of Radio and Space Physics**, v. 36, p. 268-277, 2007.

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.

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.

LIU, Z. **Ionosphere Tomographic Modeling and Applications Using Global Positioning System (GPS) Measurements**. 2004. 304 f. Ph.D. Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20198, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

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