

MAPAS DE TEC IONEX EM TEMPO REAL GERADOS PELO MODELO GIB (GRADE IONOSFÉRICA BRASILEIRA)

IONEX Real Time TEC Maps from GIB (Brazilian Ionospheric Grid)

Claudinei Rodrigues de Aguiar¹ & Alessandra Kozelinski²

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
Coordenação de Engenharia Civil - Apucarana
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Pato Branco
Rua Marcílio Dias, 635 CEP 86812-460 - Apucarana - PR - Brasil
rodriguesaguiar@utfpr.edu.br

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
Departamento de Agrimensura
Via do Conhecimento, Km 1 CEP 85503-390 - Pato Branco - PR - Brasil
alekozelski@hotmail.com

Recebido em 26 de Junho, 2015/ Aceito em 12 de Agosto, 2015
Received on June 26, 2015/ Accepted on August 12, 2015

RESUMO

Atualmente, a interferência da camada ionosférica nos sinais da banda L, transmitidos pelos satélites GNSS (Sistema Global de Posicionamento por Satélite), é a maior fonte de erro na utilização deste sistema. Durante a sua propagação entre as antenas do satélite e do receptor, os sinais GNSS são afetados pelos elétrons livres na camada ionosférica. Estes elétrons provocam alterações na velocidade de propagação, na amplitude e na fase dos sinais. Portanto, a magnitude do erro sistemático devido à interferência ionosférica é diretamente proporcional ao TEC (Conteúdo Total de Elétrons) presente no caminho do sinal transionosférico e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. Por outro lado, as redes GNSS ativas, tais como a RBMC, tornaram-se importantes estruturas de sensores para o monitoramento da ionosfera e do clima espacial. Para corrigir os efeitos ionosféricos sobre os sinais e para o monitoramento da ionosfera em tempo real, no Brasil vem sendo desenvolvido um modelo e um algoritmo para a assimilação dos dados GNSS em tempo real e geração da grade ionosférica e seu respectivo nível de confiança (GIVE – Erro Vertical da Grade Ionosférica). Este algoritmo, denominado de GIB (Grade Ionosférica Brasileira) também estima e corrige a influência das tendências interfrequências dos satélites e dos receptores, para estimar os valores absolutos do TEC. Este trabalho apresenta os resultados obtidos até o momento com o GIB, bem como os mapas ionosféricos gerados em tempo quase real estruturados em formato IONEX (IONosphere map EXchange).

Palavras chaves: GNSS, Ionosfera, NTRIP, Posicionamento Geodésico, Grade Ionosférica, GIVE.

ABSTRACT

Currently, ionosphere layer's interference on the L-band signals broadcasted by GNSS (Global Navigation Satellite System) satellites is the largest error source on positioning using this system. Free electrons in ionosphere layer affect

GNSS signals during its propagation between the satellite and receiver antennas. These electrons cause changes in the amplitude, phase and propagation velocity of the signals. Thus, the magnitude of the systematic error due to ionospheric effects is directly proportional to the TEC (Total Electron Contents) in the transionospheric signal path and inversely proportional to the square of the signal frequency. On the other hand, the active GNSS networks, such as RBMC, have become important framework of sensors for ionosphere and space weather monitoring. To fix the ionospheric effects on the signs and for ionosphere monitoring in real time, in Brazil has been developed both model and an algorithm for the real time GNSS data assimilation and generate ionospheric grid and its corresponding confidence level (GIVE – Grid Ionospheric Vertical Error). This algorithm, called GIB (Brazilian Ionospheric Grid) also estimates and corrects the satellite and receiver interfrequency biases to estimate the absolute TEC values. This paper presents the results obtained with the GIB and the ionospheric maps generated in near real time in IONEX (IONosphere map EXchange) format.

Keywords: GNSS, Ionosphere, NTRIP, Geodetic Positioning, Ionospheric Grid, GIVE.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o GNSS (Global Navigation Satellite System) tornou-se a principal ferramenta para atividades de posicionamento e navegação envolvendo aplicações militares, civis e científicas. Além destas, o GNSS também se firmou como uma importante ferramenta para o monitoramento e estudos de parâmetros referentes à troposfera e à ionosfera.

Desde a desativação da técnica SA (Selective Availability), ocorrida em 1º de maio de 2000, a ionosfera passou a ser a principal fonte de interferência na propagação dos sinais GNSS. Os efeitos de primeira ordem, que correspondem a quase totalidade do erro (~99%) (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2007; JI et al., 2014), nos sinais GNSS provocam um erro sistemático diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – Total Electron Contents) presente ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência deste sinal.

O valor do TEC não é constante e nem varia de forma regular, isso dificulta a determinação dos efeitos causados pela ionosfera nos sinais GNSS. A variabilidade temporal e espacial do TEC é influenciada por fatores como a localização geográfica, estação do ano, ciclo solar, hora local, atividade geomagnética, entre outros. As regiões equatoriais e de baixas latitudes, nas quais o Brasil está localizado, são mais afetadas pela atividade irregular da ionosfera.

Considerando que os satélites do GNSS transmitem mais que um sinal na banda L, que no caso dos satélites GPS (Global Positioning System), por exemplo, 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 no caminho dos sinais transionosféricos utilizando-se de técnicas de combinação das observáveis GNSS obtidas com receptores de, no mínimo, dupla frequência. Desta forma, os usuários de receptores de dupla frequência podem corrigir os efeitos ionosféricos de primeira ordem sobre as observáveis medidas. Além disto, esses receptores podem ser utilizados como sensores do TEC e fornecer observáveis para a geração de modelos ionosféricos.

Os usuários de receptores de simples frequência podem corrigir o erro sistemático devido à ionosfera a partir de modelos ionosféricos, tal como o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987), o NeQuick (RADICELLA, 2009) ou utilizar mapas ionosféricos globais como os GIMs (Global Ionosphere Maps) produzidos pelos centros de análise do IGS (International GNSS Service) e disponibilizados em formato IONEX (IONosphere map EXchange). A avaliação do desempenho do modelo de Klobuchar e dos GIMs/IGS na região brasileira pode ser verificada em Aguiar et al. (2003) e Matsuoka e Camargo (2007), respectivamente. Além destes, com características globais, ainda há a possibilidade de utilizar modelos nacionais e/ou regionais, como por exemplo, o Mod_Ion (CAMARGO, 1999), o Mod_Ion_FK (AGUIAR, 2005) ou o modelo GIB (Grade Ionosférica Brasileira) (AGUIAR, 2010; AGUIAR et al., 2014), desenvolvidos no Brasil.

Outra aplicação dos modelos e mapas ionosféricos está relacionada aos estudos e monitoramento do comportamento da ionosfera, com destaque as novas perspectivas com a

densificação e ampliação das redes GNSS ativas que transmitem dados em tempo real via protocolo NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol).

Neste contexto, nos últimos anos vem sendo desenvolvido um algoritmo para a assimilação dos dados GNSS em tempo real e geração de grade ionosférica e seu respectivo nível de confiança (GIVE – Grid Ionosphere Vertical Error). Este algoritmo, denominado de GIB, cujo desenvolvimento teve início em 2005, durante a pesquisa de doutorado de Aguiar (2010) realizada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP (FCT/UNESP), utiliza o filtro de Kalman para realizar a assimilação dos dados GNSS em tempo real. O GIB também estima e corrige a influência das tendências interfrequências dos satélites e dos receptores, para estimar os valores absolutos do TEC. Desde 2009, a pesquisa vem sendo continuada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), onde vem sendo aprimorado e implementados novos modelos matemáticos, bem como o desenvolvimento de algoritmos computacionais robustos para o processamento de dados.

Recentemente o algoritmo do GIB foi atualizado para gerar os mapas ionosféricos em formato IONEX, com resolução espacial de 1° em latitude e 1° em longitude, e resolução temporal de 10 minutos. Além disto, com a colaboração de pesquisadores da FCT/UNESP e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na UTFPR vem sendo executado um projeto financiado pelo CNPq (Processos 483954/2011-1 e 446642/2014-2) para a implantação de uma estrutura para o processamento de dados em tempo real e disponibilização dos arquivos IONEX aos usuários, além da análise da qualidade das correções fornecidas pelo GIB.

Neste ponto é importante destacar que o projeto da GIB é pioneiro no Brasil, onde se procurou dar os primeiros passos para fornecer uma grade ionosférica e o seu nível de confiança, a fim de permitir ao usuário obter informações a respeito da ionosfera em tempo real, e utilizá-las em aplicações de posicionamento, navegação e estudos da ionosfera.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos até o momento com o GIB, bem como os mapas ionosféricos gerados em tempo quase

real e estruturados em formato IONEX.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A ionosfera afeta os sinais GNSS no seu trajeto entre o satélite e o receptor, provocando um atraso no grupo (código) e um avanço na fase da portadora. Isto resulta num aumento nas distâncias obtidas a partir do código e numa diminuição nas obtidas pela fase da portadora de uma mesma quantidade, mas de sinais opostos.

Assim, diferentes métodos estão disponíveis para determinar o erro devido à ionosfera e então minimizá-lo nas observáveis GNSS.

2.1 A Ionosfera e os seus Efeitos nos Sinais GNSS

A atmosfera terrestre pode ser descrita, para propósitos práticos, como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas a Terra, e que apresentam diferentes propriedades físicas e químicas (HARGREAVES, 1992). Para fins desta pesquisa, pode-se adotar a divisão da atmosfera com respeito à propagação de ondas eletromagnéticas, em troposfera e ionosfera, pois ao se propagarem nestes meios, as ondas sofrem diferentes influências.

Adicionalmente, se o foco for apenas a ionosfera, como no caso deste trabalho, é apropriado considerar a divisão da atmosfera com respeito à ionização, em neutrosfera e ionosfera. Pois, a magnitude do erro devido à ionosfera sobre os sinais GNSS depende diretamente do TEC, que por sua vez está relacionado ao processo de ionização na ionosfera (Figura 1).

A ionosfera está localizada em uma região da atmosfera terrestre entre aproximadamente 50 e 1000 km de altura. Na realidade, a fronteira superior da ionosfera não é bem definida, pois, a mesma pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera. A ionosfera é caracterizada por apresentar uma alta densidade de elétrons livres capazes de afetar a propagação de ondas de rádio, tais como as transmitidas pelos satélites GPS, GLONASS, Galileo e Beidou. A formação da ionosfera está intimamente associada à radiação solar incidente na atmosfera terrestre e, com menor grau de importância, à radiação cósmica (HARGREAVES, 1992).

Altitude (km)	Temperatura	Ionização	Campo Magnético	Propagação	Técnico
100000	Termosfera	Ionosfera	Magnetosfera	Ionosfera	Atmosfera Superior
10000					
1000					
100	Mesosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera	Atmosfera Inferior
10	Estratosfera				
	Troposfera				

Fig.1 – Esquema de subdivisão da atmosfera terrestre. Fonte: Adaptada de Seeber (2003).

Consequentemente, o comportamento desta região depende da hora local, do ângulo zenital solar, da latitude, da estação do ano e do nível de atividade solar.

Quando ondas de rádio na banda L, de sistemas GNSS, tais como o GPS, viajam através da ionosfera, estas estão sujeitas a um atraso no tempo de viagem e mudanças na polarização, fase e amplitude. Este impacto ionosférico é devido ao efeito dos elétrons livres sobre os sinais de rádio. Os íons e elétrons livres na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização, o qual consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros (DAVIES, 1990).

O erro sistemático devido à refração ionosférica para a fase da portadora ($I_{f_r}^s$) e para os sinais modulados pelo código ($I_{g_r}^s$) em função do TEC e da frequência é dado por (KOMJATHY, 1997):

$$\Delta\phi_r^s = I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \tag{1}$$

$$\Delta\rho_r^s = I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}. \tag{2}$$

Assim, o erro sistemático devido à refração

ionosférica, seja ela incidente sobre a fase da portadora ou sobre os sinais modulados pelo código, é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera. Destaca-se, ainda, que a magnitude do erro na distância é igual para as medidas de pseudodistância e fase, mas com sinais opostos.

A proporção do erro devido à ionosfera pode ser observada na Tabela 1. A última coluna da Tabela 1 apresenta uma comparação do efeito da ionosfera para as frequências dos sistemas GPS, GLONASS, Galileo e Beidou em relação ao respectivo sinal L_1 de cada sistema. Os valores da Tabela 1 foram obtidos a partir da relação apresentada nas equações 1 e 2, considerando 100% do erro em L_1 calculou-se a proporção deste erro nas demais frequências dos sistemas GNSS.

Tabela 1: Proporção do erro devido à ionosfera

Sistemas	Sinal	Taxa do Erro Ionosférico
GPS	L ₁	1575,42
	L ₂	1227,6
	L ₅	1176,45
Galileo	L ₁	1,000
	L ₂	1,653
	L ₃	1202,025
	E ₁	1575,42
	E ₆	1278,75
Beidou	E _{5a}	1176,45
	E _{5b}	1207,14
	B ₁	1561,098
Beidou	B ₁₋₂	1589,742
	B ₂	1207,14
	B ₃	1268,52
		1,514

2.2 Modelagem da ionosfera em tempo real

Devido à natureza dispersiva da ionosfera, o TEC no caminho dos sinais transionosféricos pode ser determinado utilizando-se de técnicas de combinação das observáveis coletadas com receptores GNSS de dupla frequência, possibilitando o monitoramento e a modelagem da ionosfera. Neste trabalho o atraso ionosférico absoluto é estimado a partir da combinação linear livre da geometria da pseudodistância suavizada pela fase (PS):

$$I_1^v = f(z'_r)^s \frac{(PS_2 - B_1)_r^s}{\gamma - 1} - \frac{c(b^s + b_r)}{\gamma - 1} \quad (3)$$

onde I_1^v é o atraso ionosférico em metros em L1, na direção vertical. O termo $f(z'_r)^s$ é a função de mapeamento que projeta o atraso ionosférico da direção satélite/receptor para a vertical (AGUIAR, 2010). A constante $\gamma = f_{L1}^2 / f_{L2}^2 = (7 / 6)^2$, para observáveis GPS, é obtida a partir das frequências L1-L2 e converte o erro para L2. Os termos bs e br representam as tendências interfrequência dos satélites e dos receptores, respectivamente.

Na equação 3 o valor do atraso ionosférico é obtido em unidade de metros, pois é a unidade de interesse para aplicar as correções nas observáveis GNSS. No entanto, para o monitoramento e estudos do comportamento da ionosfera é interessante quantificar o atraso em densidade de elétrons na ionosfera, relacionando-

se o I_1^v ao VTEC (Vertical TEC) pela equação 2.

Assim, as redes GNSS ativas que inicialmente foram implantadas para servir como apoio geodésico básico ou, numa situação mais moderna, pertencem a um SBAS (Satellite Based Augmentation System), para dar apoio principalmente a aplicações de navegação, entre outras aplicações que também se firmaram como uma importante estrutura de sensores para o monitoramento de parâmetros da atmosfera, com destaque à troposfera e ionosfera.

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 que nº 2004/03384-5, 2004/09235-1 e 2006/04008-2) e, posteriormente, algumas estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) também passaram a disponibilizar os dados em tempo real, utilizando o protocolo de transporte



Fig. 2 – RBMC-IP. Fonte: <http://www.ibge.gov.br/>.

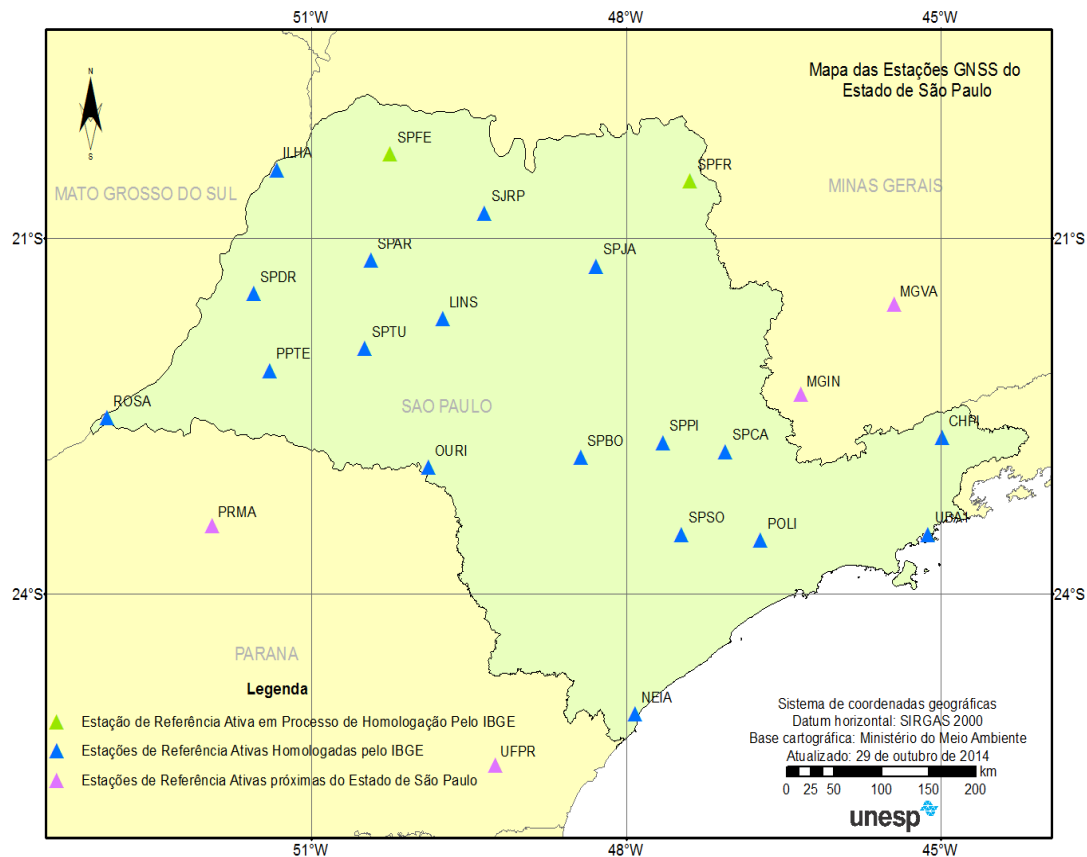


Fig. 3 – Rede GNSS SP. Fonte: gege.fct.unesp.br.

NTRIP. Estas estações da RMBC compõem a rede que vem sendo denominada de RBMC-IP. As figura 2 e 3 apresentam a distribuição atual das estações da RBMC-IP e REDE GNSS SP.

Para a execução deste trabalho tem-se à disposição as estações de referência que pertencem a RBMC-IP, que no período de execução deste projeto passou de 27 estações em 2011 e chegou a 92 estações em junho de 2015. As estações da REDE GNSS SP, que atualmente conta com 18 estações homologadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 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*.

A REDE GNSS SP e a RBMC-IP transmitem os dados em tempo real utilizando o protocolo de transporte NTRIP o qual é um protocolo para fluxo de dados GNSS na Internet. Trata-se de um protocolo genérico baseado no http, com um padrão RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) projetado para propagar dados de correção

diferencial ou outros tipos de fluxo de dados GNSS para usuários estacionários ou móveis através da internet (Figura 4). Com relação à transmissão de correções diferenciais, o DGPS-NTRIP vem apresentando resultados melhores do que o DGPS-RDS (*Radio Data System*) (SEJAS et al., 2013). Outra possibilidade para a melhora do desempenho do DGPS é aplicar o conceito de redes (ALVES et al., 2013), no qual o NTRIP mantém um papel importante na estrutura de transmissão de dados. Atualmente o NTRIP também vem sendo bastante utilizado em aplicações PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) em tempo real (Marques et al., 2014).

O estado da arte na modelagem da ionosfera está em desenvolver e/ou aprimorar métodos capazes de fornecer aos usuários do GNSS correções ionosféricas confiáveis, em tempo real e utilizando estruturas simples de transmissão de dados. Dentro desta necessidade e com o surgimento dos sistemas de apoio à navegação, tal como o SBAS, esforços estão voltados em fornecer informações de correção

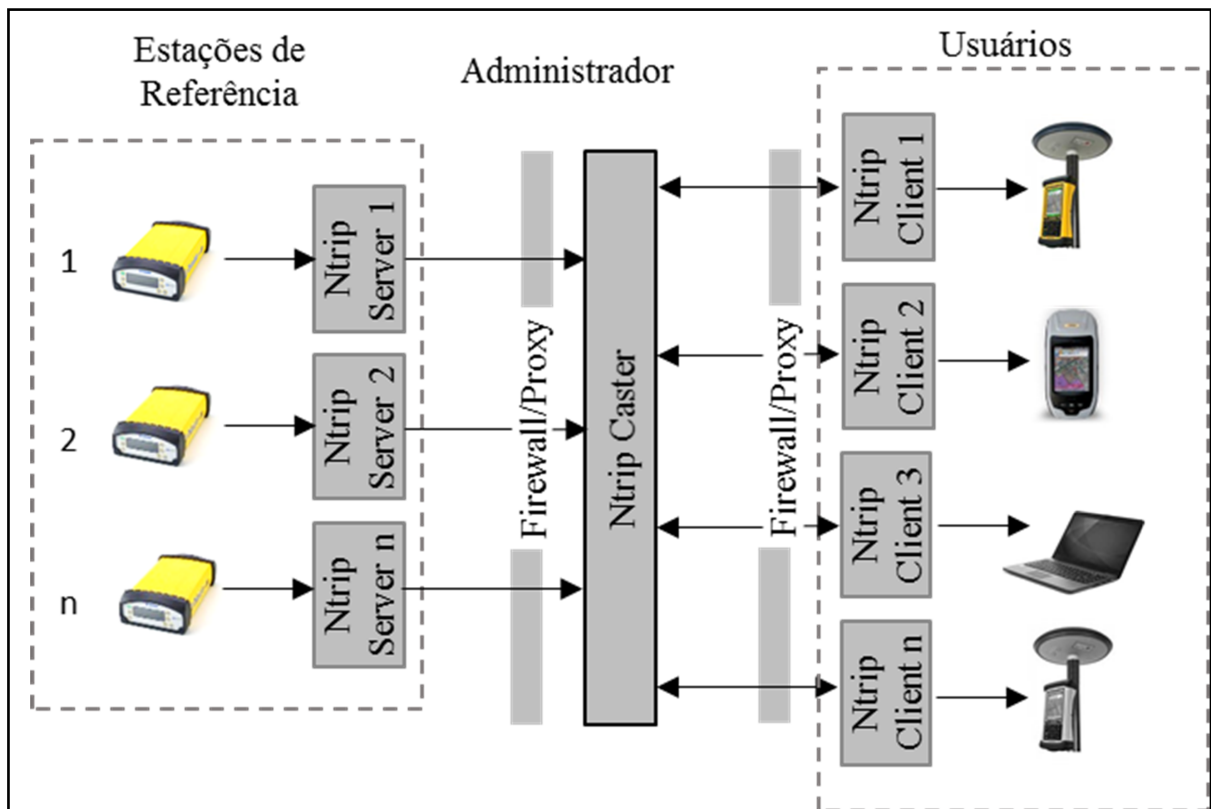


Fig. 4 – Sistema do fluxo de dados via NTRI.

do erro sistemático da ionosfera utilizando uma estrutura de grade regular de pontos. Além disto, esforços também vêm sendo direcionados para corrigir a limitação na performance (ICAO, 2006) dos atuais métodos de geração de grade em regiões equatoriais.

Desta forma, considerando o estado da arte e baseado em uma série de pesquisas realizadas nos últimos anos (AGUIAR, 2005; AGUIAR; CAMARGO, 2006; AGUIAR et al., 2003; MATSUOKA; CAMARGO, 2007), Aguiar (2010) desenvolveu um método para gerar uma grade ionosférica e seu nível de confiança (GIVE), 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.

O trabalho desenvolvido resultou em um algoritmo computacional denominado GIB, capaz de gerar a grade ionosférica e o GIVE, bem como a visualização gráfica dos resultados (mapas) em quase 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.

A fim de minimizar a influência do gradiente espacial do TEC, o qual é o maior fator limitante da função de modelagem que considera a aproximação da ionosfera como uma fina camada, o GIB adota uma função de decomposição da camada ionosférica em subcamadas.

A partir da subdivisão da camada da ionosfera, o ângulo zenital do satélite, calculado no ponto ionosférico, é obtido pela equação (AGUIAR, 2010):

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

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 5 ilustra as quantidades envolvidas na equação 4.

O GIB também é capaz de estimar o atraso ionosférico vertical em uma grade que pode ser atualizada continuamente, onde cada

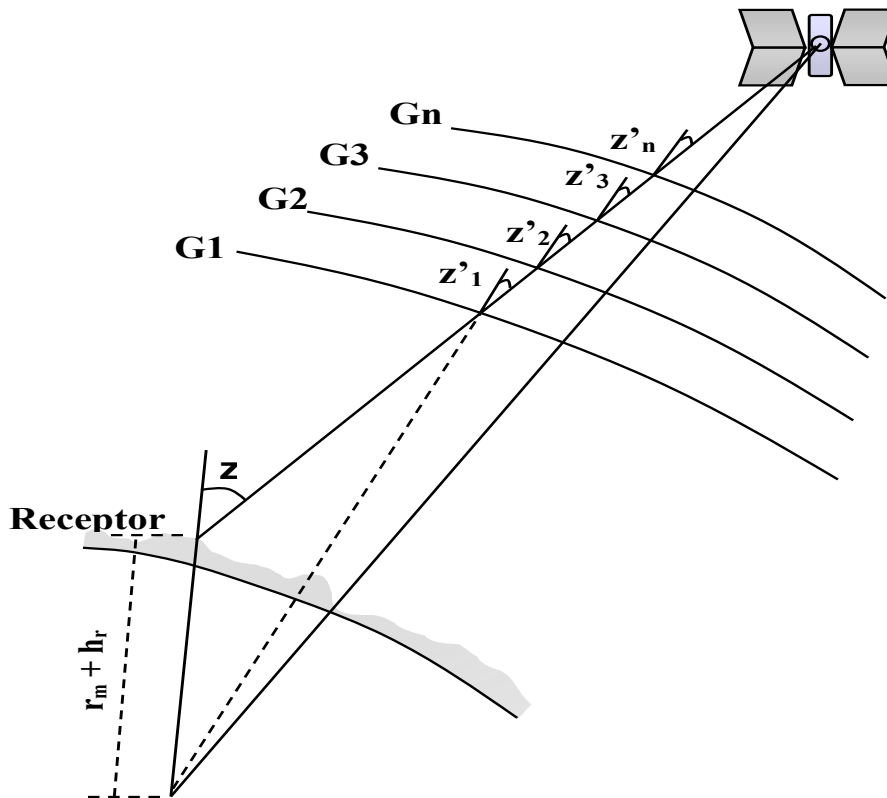


Fig. 5 - Geometria para a decomposição do caminho ionosférico. Fonte: Aguiar (2010).

IGP (*Ionosphere Grid Point* □ Ponto da Grade Ionosférica) representa o efeito sistemático ionosférico estimado pelos pontos ionosféricos mais próximos, bem como estimar os valores do GIVE. Outro ponto de destaque é que para se determinar o atraso ionosférico em cada IGP a função de interpolação é definida de forma dinâmica, onde a função peso depende do número de pontos ionosféricos disponíveis para a geração da grade. Mais detalhes sobre o algoritmo e modelos matemáticos adotados no GIB podem ser encontrados em Aguiar (2010).

3. MATERIAIS E METÓDOS

O objetivo do projeto desenvolvido atualmente é a implantação de uma estrutura (Servidor) para a instalação do aplicativo GIB e realização das correções de código fonte necessárias para a execução do mesmo em tempo real e de forma contínua 24 horas por dia. Além disto, foram realizados trabalhos para a geração de mapas de VTEC em quase tempo real, para o Brasil, disponibilizados em formato IONEX.

Desta forma, o GIB foi executado para o processamento *online* das observáveis GPS fornecidas (via protocolo NTRIP) pelas estações

das redes RBMC-IP e Rede GNSS SP. Nesta etapa os dados dos receptores GNSS das referidas redes são baixados diretamente em um computador (ou servidor) conectado à internet, utilizando o programa BNC (BKG NTRIP *Client*) disponível na NTRIP Homepage (<http://igs.bkg.bund.de/ntrip/index>).

O aplicativo BNC permite: obter flux de dados GNSS em tempo real, disponível por meio do protocolo de transporte NTRIP; gerar arquivos RINEX em alta taxa, para suporte em aplicações de pós-processamento e em tempo real; e/ou transferência de observações sincronizadas época por época, por meio de um IP para suporte em tempo real aos instrumentos GNSS.

Os dados GNSS são obtidos via os servidores do LGE (Laboratório de Geodésia Espacial), da FCT/UNESP, e IBGE. Os receptores GNSS das redes ativas possuem um aplicativo *NTRIP Caster*, que transmite 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 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 6 apresenta um resumo do fluxograma do processamento dos dados em tempo real.

Com o aplicativo GIB em execução online foi necessária a avaliação do seu funcionamento e análises dos erros de execução, que ocorrem devido a oscilações na conexão com a internet, interrupções no fluxo de dados de uma determinada estação, entre outras ocorrências que podem provocar a interrupção na execução do GIB e impedir seu funcionamento contínuo. Esta é a principal fase do trabalho, pois consiste na correção e atualização do código fonte do GIB para que o mesmo possa gerar dados em tempo real, de forma contínua e sem falhas, para que estes sejam disponibilizados aos usuários.

Nesta etapa o ALDAR e demais

algoritmos do GIB sofreram atualização, além do desenvolvimento de novos algoritmos, para tornar possível a sua execução contínua e garantir fatores como a continuidade e disponibilidade do serviço de monitoramento e modelagem da ionosfera em tempo real.

3.1 Infraestrutura

Um dos principais objetivos do projeto (CNPq Processos 483954/2011-1 e 446642/2014-2) visa realizar melhorias no aplicativo GIB, para que o mesmo seja executado ininterruptamente e os seus dados possam ser disponibilizados. Para isso, neste projeto foi dado início à implantação de uma infraestrutura para os estudos e pesquisas envolvendo o GNSS e a modelagem da ionosfera. Para o desenvolvimento do trabalho foi estruturado um ambiente para a instalação do servidor Servidor PowerEdge R210II (Figura 7), o qual recebeu a instalação do GIB e do BNC para o processamento dos dados GNSS e geração da grade ionosférica e do GIVE em tempo quase real, no formato IONEX.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

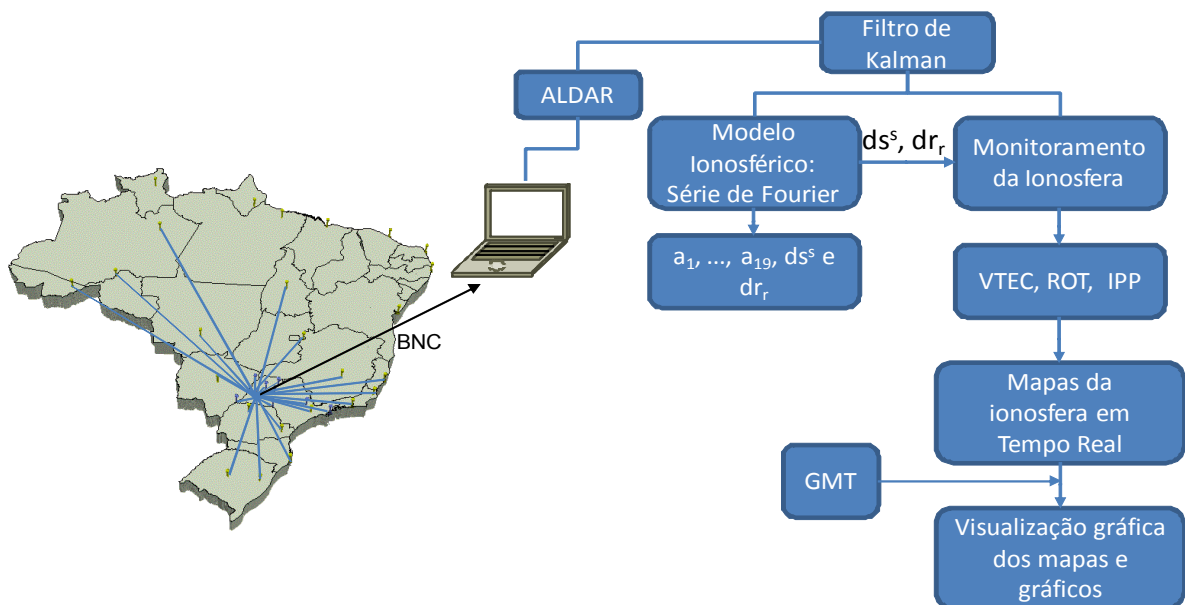


Fig. 6 – Fluxograma para processamento de dados GNSS em tempo real com o GIB.



Fig. 7 – Servidor para execução do GI e desktop para atividades gerais do projeto.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o processamento de dados em tempo real, utilizando o GIB no modo *online*. Também são apresentados alguns exemplos de mapas ionosféricos gerados a partir do arquivo padrão IONEX. A qualidade dos dados gerados pelo modelo ionosférico foi avaliada pelo posicionamento por ponto, cujos os resultados para alguns dias também são apresentados.

4.1 Execução do GIB no modo *online*

O GIB foi instalado no servidor e executado inúmeras vezes a fim de realizar testes de execução. Nesta etapa foi detectado que o principal motivo de se ter sua execução interrompida foi a necessidade de *download* automático das efemérides ultra-rápidas necessárias para o processamento em tempo real.

Outro fator que causa a parada na execução do GIB é a queda de conexão com as estações GNSS NTRIP que, principalmente, devido à falha de conexão na internet deixa de receber fluxo de dados (estações fora do ar). Também foi observada falha na ocorrência da entrada de uma nova estação, que no momento do início da execução do GIB não estava transmitindo dados,

mas no decorrer do processamento passou a transmitir dados e o aplicativo não processou as observações disponibilizadas pela nova estação.

Portanto, nos testes realizados antes de completar 24 horas de processamento se alguma estação da RBMC-IP ou da Rede GNSS SP ficava inativa causava a parada do GIB. Uma estação fi ar inativa é imprevisível, portanto pode ocorrer após 1 segundo de processamento como também pode não acontecer durante as 24 horas. Nos testes iniciais o GIB processou uma média de 3 a 4 horas até que perdesse conexão com alguma estação.

Assim, foi necessário o aperfeiçoamento do algoritmo que verifica e automaticamente atualize a lista das estações ativas. Também foi desenvolvido em C++ um algoritmo para o *download* automático das efemérides ultra-rápidas disponibilizadas pelo IGS.

Após as atualizações no código fonte e desenvolvimento de novos códigos o aplicativo GIB passou a processar uma média de 72 horas sem interrupção. As interrupções ocorridas após 72 horas de processo são provocadas principalmente por inconsistência nos dados. Para trabalhos futuros serão analisados quais os motivos das inconsistências que provocam a parada do processamento.

Como resultado desta etapa observou-se também a necessidade de desenvolver um algoritmo do tipo *watchdog*, capaz de detectar a execução inadequada do GIB e disparar eventos que façam o aplicativo reiniciar corretamente.

4.2 Mapas do VTEC em formato IONEX

Para a disponibilização de dados aos usuários foi escolhido o formato padrão IONEX. Para isto foram desenvolvidos novos algoritmos para a geração dos mapas de VTEC neste formato. Também foi necessária a implementação de um algoritmo de atualização de cabeçalhos IONEX, pois como os arquivos são gerados e atualizados em tempo real, as informações dos mapas de VTEC contidas no cabeçalho do arquivo também devem ser atualizadas em tempo real. A Figura 8 mostra um fragmento do IONEX gerado pelo GIB.

O código fonte para a geração do IONEX foi escrito em Fortran 2013 usando técnicas de

Mapas de TEC IONEX em Tempo Real Gerados pelo Modelo GIB

```

1.0                IONOSPHERE MAPS GPS                IONEX VERSION / TYPE
BIG Model          GEPG                               03-DEC-13 00:15  PGM / RUN BY / DATE
Mapa Regional da Ionosfera para o dia 337 ,2013      COMMENT
Os mapas da ionosfera são gerados a partir do processamento de dados GPS de 035 estações. O conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) é modelado no referencial geomagnético sola usando uma função de interpolação adaptativa. Em função do número de pontos ionosféricos (IPP) observados a função de interpolação será escolhida entre polinômio, ajuste do plano, inverso da distância ponderado pela decorrelação espacial do VTEC. Para estimar os coeficientes das funções de interpolação é adotada o algoritmo do Filtro de Kalman. As tendências instrumentais dos satélites e receptores, também denominada de Differential P1-P2 Code Biases (DCB), são estimadas utilizando um polinômio de segunda ordem e o filtro de Kalman. As tendências P1-C1 são corrigidas quando necessário. Para projetar o TEC na direção vertical é usada a função de mapeamento geométrica modificada.
2013 12 3 1 20 0
2013 12 3 2 15 0
300
12
FMGM
30.0
Pseudorange code smoothed by carrier phase
35

6378.1
2
400.0 400.0 .0
10.0 -35.0 1.0
-75.0 -30.0 1.0
-1
Valores de TEC/RMS em 0.1 TECU; 9999,se valor indisponível
Lista de estações:
BELE BOAV BRAZ CEEU CEFE CUIB ILHA IMBT MAPA MGBH MSCG NAUS
ONRJ OURI POAL POLI POVE PPTE RECF RIOB RIOD RJCG RNNA SALU
SAVO SJRP SMAR SPCA SPFR SPJA SPLI SPPI TOPL UBA1 UFPR

1
2013 12 3 1 20 0
10.0 -75.0 -30.0 1.0 400.0

```

Fig. 8 – Cabeçalho do arquivo IONEX gerado pelo GI.

programação orientada a objeto. Para verificar se os arquivos IONEX gerados pelo GIB estavam corretos, sem falhas, com dados corrompidos ou erro de formatação, os mapas de VTEC foram visualizados a partir da ferramenta Plot IONEX

Map (Figura 9), disponível no aplicativo Leica Spider QC (LEICA SPIDERQC, 2010).

Considerando a análise da resolução espacial e temporal da grade ionosférica em

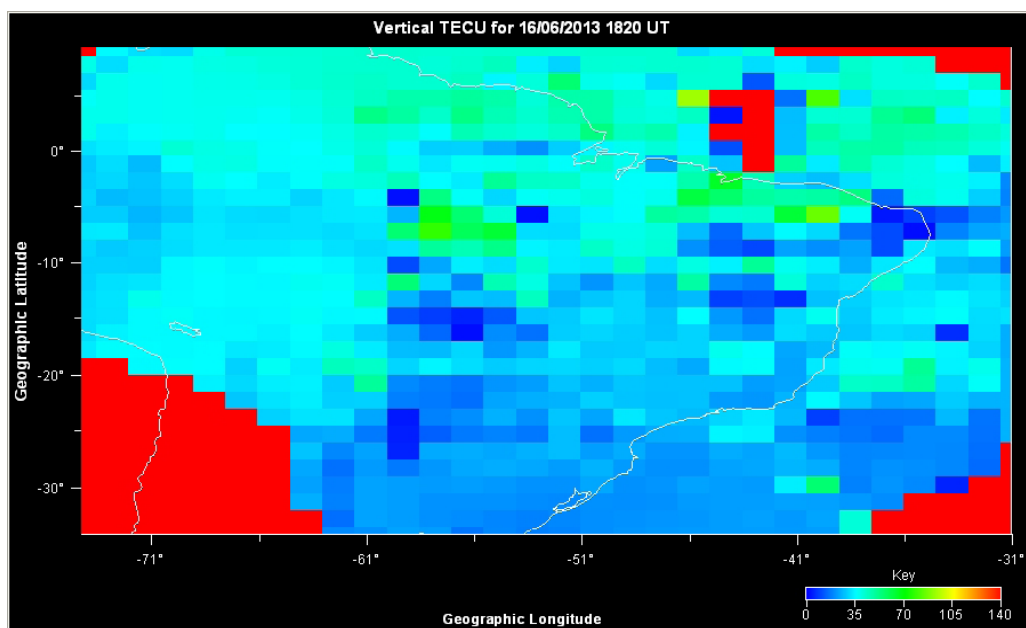


Fig. 9 – Mapa de VTEC IONEX para o Brasil visualizado no Leica Spider QC.

função da distribuição e da densidade das estações de referências das redes GNSS ativas, conforme Aguiar e Camargo (2012), foi definido disponibilizar as informações da densidade de elétrons na ionosfera, bem como do GIVE em formato IONEX com resolução espacial de 1° em latitude e 1° em longitude, e resolução temporal de 10 minutos. Os mapas ionosféricos gerados pelo GIB têm uma resolução superior quando comparados aos mapas globais fornecidos pelo IGS em formato IONEX com resolução espacial de 5° em longitude e 2,5° em latitude, com resolução temporal de 2 horas.

Além de gerar os arquivos IONEX, no aplicativo GIB foi implementada a função para gerar a visualização gráfica dos mapas de atraso ionosférico e GIVE, em intervalos pré-determinados e em formato GIF (Graphics Interchange Format). Para isso são utilizados pacotes do GMT e do ImageMagick. Essa funcionalidade do GIB permite gerar a visualização dos mapas com intervalo máximo

de 1 segundo. Como mencionado anteriormente, foi definido como padrão gerar mapas a cada 10 minutos (resolução temporal), portanto são gerados 144 mapas de VTEC e 144 mapas de GIVE, totalizando 288 mapas por dia.

Nas figuras 10 e 11 observa-se um exemplo de um mapa da grade de atraso ionosférico (GAI) gerado no dia 03/12/2013, às 2 horas e 10 minutos TU (Tempo Universal), e o respectivo mapa do GIVE, ambos gerados com os dados GNSS em tempo real das estações disponíveis naquele momento. Vale salientar que as figuras citadas representam exemplos dos produtos finais gerados pelo GIB. A próxima etapa do projeto, com o auxílio financeiro do CNPq (Processo 446642/2014-2), será a avaliação da qualidade destes produtos (GAI e GIVE) em diferentes níveis de atividade solar, bem como em diferentes condições ionosféricas.

Nas figuras 10 e 11, apesar de ser um período de alta atividade solar, no ciclo solar

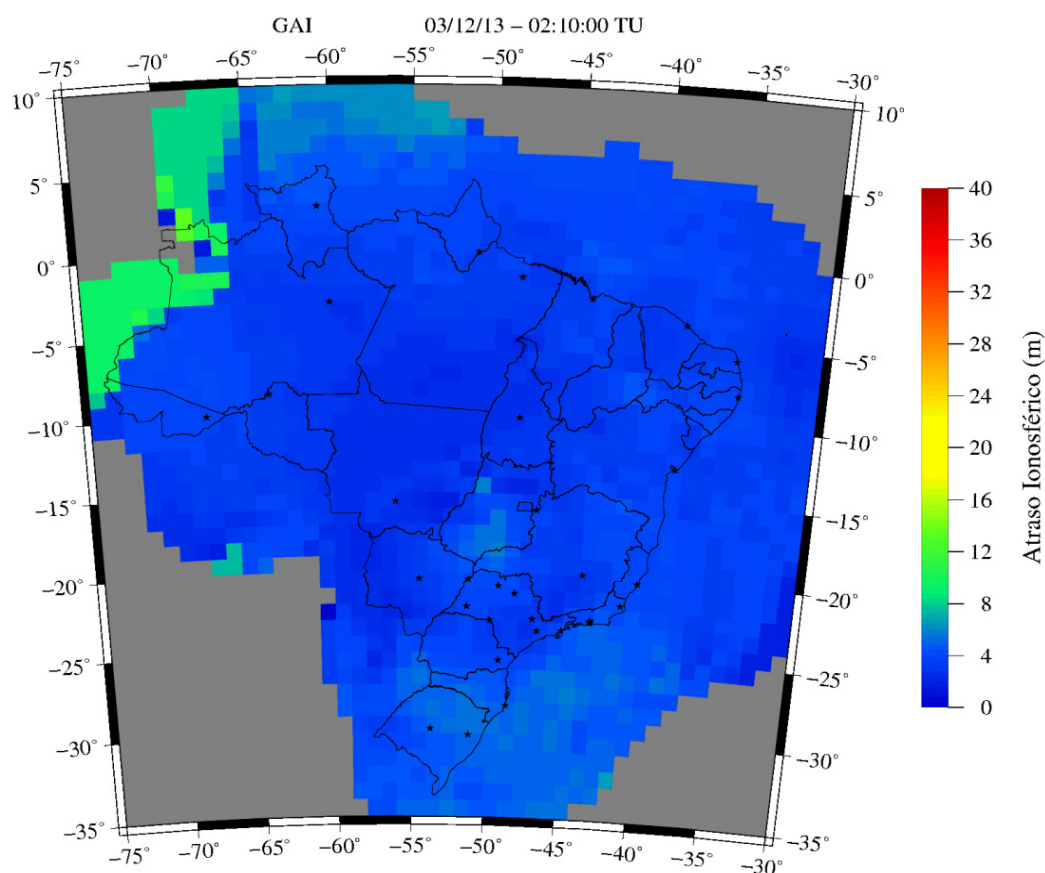


Fig. 10 – Grade de atraso ionosférico gerada pelo GIB em tempo real.

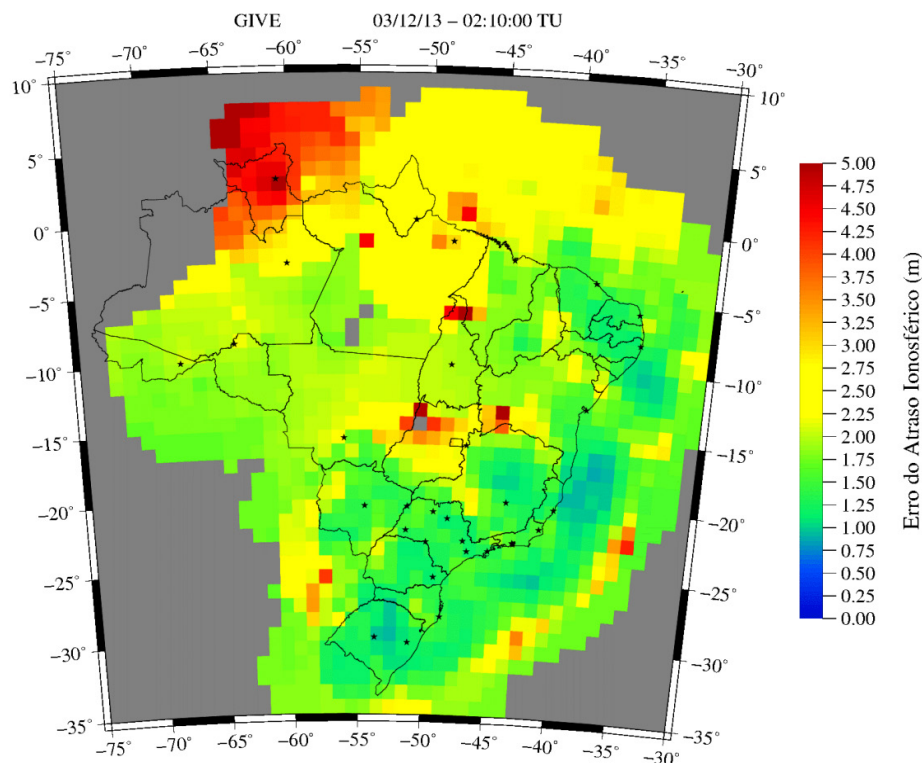


Fig. 11 - GIVE gerado pelo GIB em tempo real.

24, nota-se que o dia avaliado e horário não apresentou valores significativos de atraso ionosférico. Na GAI os pixels na cor cinza representam os IGPs da grade ionosférica que não tiveram nenhum IPP observado em sua circunvizinhança. Para o mapa do GIVE, os pixels na cor cinza representam os IGPs que não tiveram quantidade suficiente de IPPs observados, para se determinar o nível do erro que o usuário pode estar cometendo ao utilizar os valores de atraso ionosférico (ou VTEC) calculados pelo GIB. É importante salientar que este é único modelo brasileiro a fornecer estas informações aos usuários.

Com relação ao processamento com o GIB em tempo real pode-se observar, ainda nas figura 10 e 11, que seu desempenho está limitado em algumas regiões e é fortemente influenciado pela distribuição e densidade das estações que compõem as redes GNSS NTRIP. Verifica-se que as regiões norte e centro-oeste do Brasil há um baixo número de estações NTRIP, o que impacta diretamente no nível do erro do atraso ionosférico calculado para aquelas regiões, onde o GIVE apresenta os maiores valores de erro,

chegando a 5 metros, e em algumas células os valores do GIVE não foram fornecidos.

Considerando o contexto atual da densificação das estações da RBMC-IP, as figuras 12 e 13 mostram, respectivamente, um exemplo dos produtos GAI e GIVE gerados recentemente pelo GIB, com a rede mais densa fornecendo dados em tempo real.

Nas figuras 12 e 13 observa-se um exemplo de processamento para o dia 25/06/2015, no qual o GIB utilizou 84 estações para gerar a GAI e o GIVE. Comparando os mapas gerados no exemplo atual com o anterior (figuras 10 e 11), verifica-se que a densificação e a distribuição das estações de referência tem impacto direto no modelo ionosférico em termos de cobertura territorial das correções, bem como do nível de confiança das correções fornecidas e, conseqüentemente, na qualidade dos resultados de posicionamento e navegação obtidos com as correções ionosféricas a partir da GAI.

4.3 Análise da qualidade das correções a partir dos mapas IONEX gerados pelo GIB

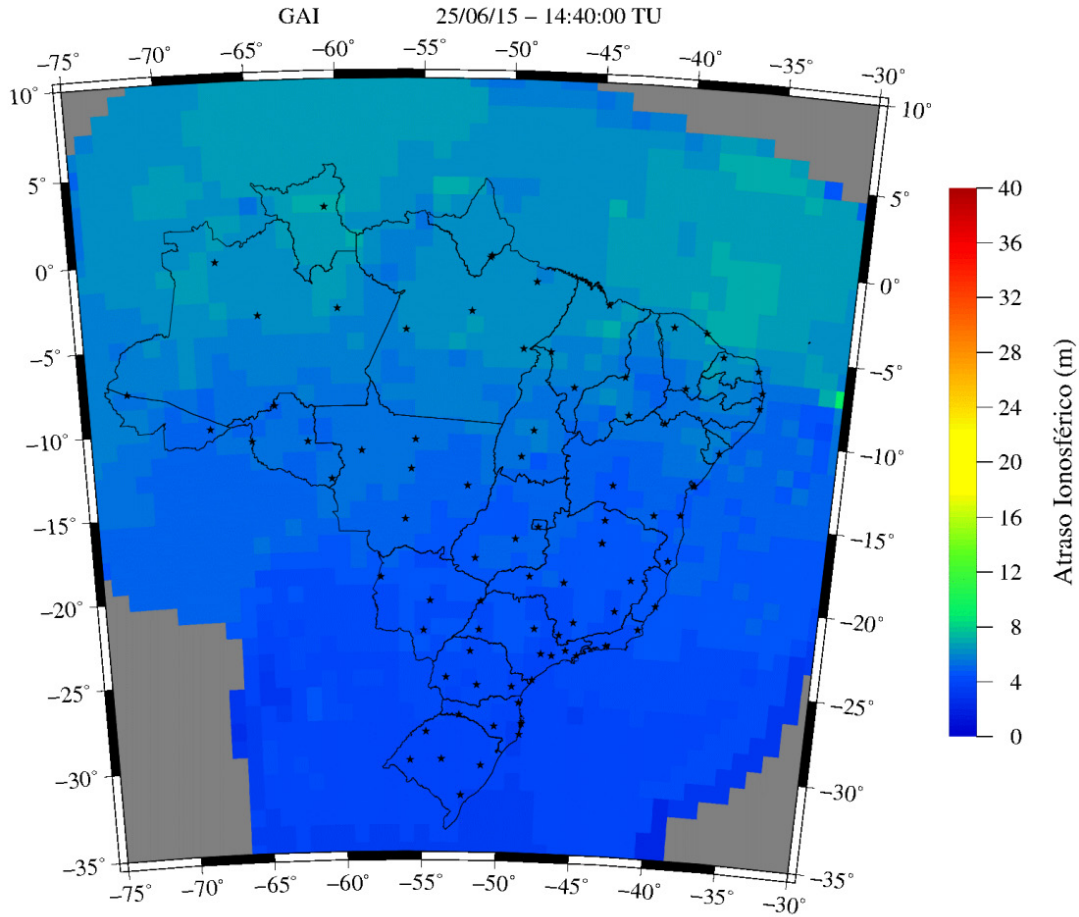


Fig. 12 – Grade de atraso ionosférico gerada pelo GIB em tempo real.

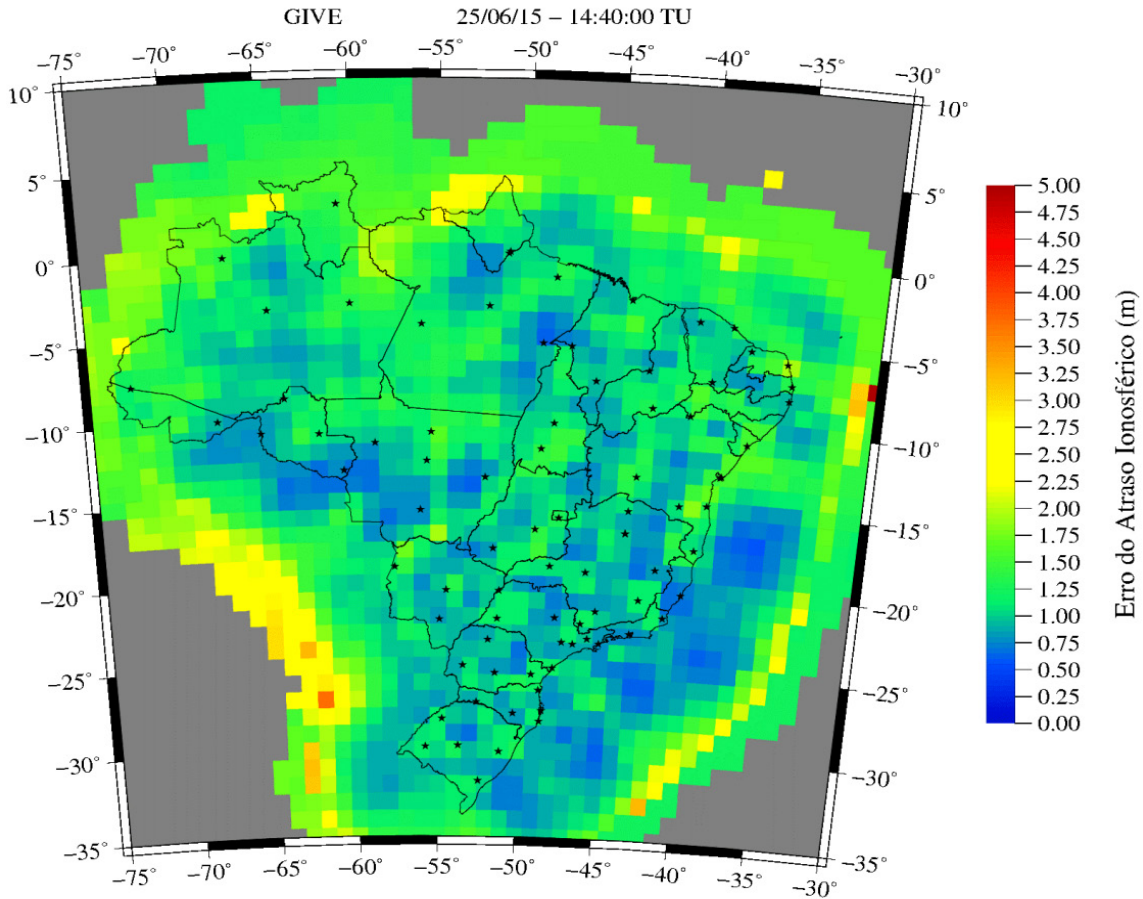


Fig. 13 – GIVE gerado pelo GIB em tempo real.

Esta etapa do projeto está em fase inicial. O objetivo é a avaliação da qualidade das correções realizadas pelo usuário, a partir dos mapas IONEX gerados pelo GIB, com resolução espacial de 1° e resolução temporal de 10 minutos.

Aqui são apresentados os resultados do experimento realizado para os dias 21 e 24 de janeiro de 2014, dias de alta atividade solar dentro do ciclo 24 e também são dias classificados como geomagneticamente calmos. Nesta etapa o objetivo é avaliar o GIB em dias sem atividades ionosféricas extremas, como por exemplo as tempestades ionosféricas. Em trabalhos futuros o GIB será avaliado sob diversas condições ionosféricas.

A avaliação do mapa IONEX foi realizada aplicando-se o posicionamento por ponto absoluto na estação PPTE, localizada em Presidente Prudente – SP. Esta estação foi escolhida, para simular o receptor do usuário, devido à sua latitude geomagnética.

Assim, 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 o posicionamento por ponto utilizou-se os arquivos RINEX da PPTE sem a correção da ionosfera (SCI) e com a correção (CCI) fornecida pelo IONEX gerado no GIB. Obteve-se então 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.

As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados das discrepâncias para as coordenadas cartesianas SCI e CCI, para os dias 21 e 24 de janeiro. A Tabela 4 apresenta a comparação entre os resultados em termos de porcentagem da melhora da qualidade do posicionamento após a correção do efeito da ionosfera.

Tabela 2: Discrepância média e desvio padrão sem a correção do efeito ionosférico

	Discrepância Média			Desvio Padrão
	DX (m)	DY(m)	DZ(m)	σ_{DXYZ} (m)
21/01	6,144	-6,800	-4,183	3,956
24/01	5,529	-6,822	-4,314	5,324

Tabela 3: discrepância média e desvio padrão com a correção do efeito ionosférico

	Discrepância Média			Desvio Padrão
	DX (m)	DY(m)	DZ(m)	σ_{DXYZ} (m)
	-1,391	3,758	1,062	4,988
	-2,573	4,823	1,553	4,837

Tabela 4: porcentagem da melhora na discrepância média

	Porcentagem de melhora		
	DX (%)	DY (%)	DZ (%)
21/01	77,36	44,74	74,61
24/01	53,46	29,30	64,00

Pelas tabelas observa-se que os resultados obtidos com os mapas ionosféricos gerados pelo GIB são promissores. Para os dois dias analisados houve melhora no resultado do posicionamento por ponto absoluto.

Nas próximas etapas do projeto, serão comparados os resultados do posicionamento aplicando-se correções a partir dos mapas IONEX do GIB com os do IGS.

5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

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 e posicionamento, 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. Durante o seu desenvolvimento, o modelo e o aplicativo computacional do GIB vem sendo testado em

várias situações e foram detectadas algumas limitações para a sua execução contínua, 24 horas por dia, em um servidor. Os principais problemas encontrados foram solucionados e o algoritmo do GIB sofreu várias modificações, incluindo atualizações de código fonte e desenvolvimento de novos códigos e bibliotecas computacionais, a fim de permitir que o aplicativo trabalhe de forma ininterrupta no processamento de dados GNSS NTRIP em tempo real.

Das análises realizadas conclui-se que a grade ionosférica e o GIVE têm 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 grade ionosférica, fato este que tem impacto direto no GIVE. Além disto, a acurácia destas correções também é afetada pela tendência de interferência dos satélites e receptores. Fatores como disponibilidade, continuidade, integridade e acurácia da grade ionosférica também afetam significativamente a qualidade do posicionamento e navegação do usuário.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Modelagem em Tempo Real do Erro Sistemático das Observáveis GPS Devido à Ionosfera. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 12, n. 1, p.101-120, jan-jun. 2006.

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Resolução espacial da Grade Ionosférica e do GIVE. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, p. 464-479, 2012.

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**. Curitiba: UFPR, 2003. vol.3, p.119-132.

AGUIAR, C. R.; CERETTA, G. M.; LAPA, H. S.; CAMARGO, P. O.; PAULA, E. R. Geração de mapas de TEC em quase tempo real e estrutura para disponibilização de dados em formato IONEX. In: **XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia**, Gramado-RS, 2014. Anais. p. 1-9, 2014.

ALVES, D. B. R.; ABREU, P. A. G.; SOUZA, J. S. GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Revista Brasileira de Geomática**, Curitiba, v. 1, n.1, p.8-13, 2013.

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.

DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.

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.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; ORU'S, R. Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates, **Journal of Geophysical Research**, v. 112, B08417, p.1-16, 2007. doi:10.1029/2006JB004707.

ICAO. International Civil Aviation Organization. **Fifth Coordination Meeting of RLA/00/009**

- Project – GNSS Augmentation Trials.** 2006. 155f. Report RCC/5-RLA/00/09. ICAO, Lima, 2006.
- JI, S. ; WENG, D.; WANG, Z.; CHEN, W.; CHAN, W. Second-order ionospheric effect on PPP over Hong Kong, **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 119, p.184-192. 2014, doi: 10.1016/j.jastp.2014.08.005.
- KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.AES-23, n.3, p.325-331, 1987.
- 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.
- LEICA SPIDERQC. Version 4.0.0.49 – Free. Switzerland: Leica Geosystems AG, 2010. Disponível em: <<http://www.leica-geosystems.com/>>. Acesso em: 08 mar. 2012.
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; SHIMABUJURO, M.; OYAMA, R. T.; WENTZ, J. P. PPP em tempo real: fundamentos, implementação computacional e análise de resultados no modo estático e cinemático. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 66, n. 6, p.1331-1345, nov.-dez. 2014.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção Ionosférica utilizando os Mapas Globais do TEC do IGS: Avaliação do posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 13, n. 2, p.253-270, jul-dez. 2007.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy.** 2 ed. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- RADICELLA, S. M. The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution. **Annals of Geophysics**, vol. 52, n. ¾, p. 417-422, jun.-aug. 2009
- SEJAS, M. I.; SAATKAMP, E. D.; JUNIOR, J. F. Posicionamento por DGPS: experimentos para avaliação das técnicas RDS, NTRIP e DGPS em rede. **Revista Brasileira de Geomática**, Curitiba, v. 1, n.1, p.14-22, 2013.
- TAKASU, T. **RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning.** ver. 2.4.2. Japan: Tokio. 2013. 183p.