

# RESOLUÇÃO ESPACIAL DA GRADE IONOSFÉRICA E DO GIVE

## *Ionospheric Grid and GIVE Spatial Resolutions*

CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR<sup>1</sup>  
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR  
Campus Pato Branco – Via do Conhecimento, km 01  
CEP 85503-390 – Pato Branco PR

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP  
Faculdade de Ciências e Tecnologia – Depto de Cartografia  
Rua Roberto Simonsen, 305  
CEP 19060-900 – Presidente Prudente SP  
rodriguesaguiar@utfpr.edu.br, paulo@fct.unesp.br

### RESUMO

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 os SBASs (*Satellite Based Augmentation Systems*), esforços estão voltados em fornecer informações de correções 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 dos atuais métodos de geração de grade ionosférica em regiões equatoriais. Neste contexto, num trabalho pioneiro no Brasil, foi proposto um método para a geração da Grade Ionosférica (GI) e seu nível de confiança (GIVE – *Grid Ionospheric Vertical Error*) a fim de melhorar a acurácia de posicionamento e navegação pelo GNSS, além de fornecer uma ferramenta que possa ser utilizada na área de estudos da ionosfera. Este trabalho apresenta uma análise para definir a resolução espacial mais viável para a GI e para o GIVE, bem como o impacto da distribuição das estações de referência na definição de tal resolução.

**Palavras-chave:** Grade Ionosférica; GIVE; Resolução Espacial; GNSS.

### ABSTRACT

The state-of-the-art of ionosphere modeling is to develop and to improve methods to provide reliable ionospheric corrections in real time to GNSS users using simple structures for data broadcast. Considering this requirement and support systems for navigation, such as SBAS (Satellite Based Augmentation Systems), efforts are made to provide information to the corrections of the ionospheric systematic error using a regular grid of points. In addition, efforts are also being directed to improve the performance of current methods used to generate ionosphere grid in equatorial regions. In this context, a pioneering work in Brazil was proposed a method for the generation of Ionospheric Grid (GI) and the level of confidence (GIVE - Grid Ionospheric Vertical Error) to improve the accuracy of GNSS positioning and navigation, as well as provide a tool can be used in the research on the ionosphere. This paper presents an analysis for setting the spatial resolution most viable for GI and GIVE, as well as the impact of the distribution of reference stations.

**Keywords:** Ionospheric Grid; GIVE; Spatial Resolution; GNSS.

### 1. INTRODUÇÃO

O efeito da ionosfera é a maior fonte de erro sistemático nos sinais transmitidos pelos satélites do GNSS (*Global Navigation Satellite System*), o qual afeta principalmente a acurácia do posicionamento e da navegação quando se utiliza de receptores de simples frequência, bem como a solução da ambiguidade. Este erro sistemático é diretamente proporcional ao TEC (Conteúdo Total de Elétrons) presente ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência deste sinal.

Devido à natureza dispersiva da ionosfera, o TEC pode ser determinado a partir das observáveis coletadas com receptores GNSS de dupla frequência, possibilitando o monitoramento e a modelagem da ionosfera. Atualmente, os usuários de receptores de simples frequência podem corrigir o erro sistemático devido à ionosfera utilizando modelos como o de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987), o NeQuick (RADICELLA, 2009), os GIMs (*Global Ionospheric Maps*) (GIM, 2012) e os mapas ionosféricos SIRGAS-UNLP gerados a partir do Modelo Ionosférico de La Plata (LPIM) (BRUNINI et al., 2010). 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.

Para algumas aplicações de navegação, tal como na aérea, apenas os sinais transmitidos na frequência L1 do GPS (*Global Positioning System*) e do GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) são permitidas para serem utilizadas nos Serviços de Radionavegação Baseados em Satélites (RNSS). Neste tipo de aplicação é necessário aplicar correções do atraso ionosférico transmitidas por satélites geoestacionários que compõem os SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), sendo que neste sistema as informações do atraso ionosférico são transmitidas em estrutura de grade.

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, tais como a estrutura de grade regular de pontos (POWELL; WALTER, 2010; SEO, 2010).

Neste contexto, no Brasil, Aguiar (2010) propõe um método para a geração da Grade Ionosférica (GI) e seu nível de confiança (GIVE – *Grid Ionospheric Vertical Error*) a fim de melhorar a acurácia de posicionamento e navegação pelo GNSS, além de fornecer uma ferramenta que possa ser utilizada na área de estudos da ionosfera.

A pesquisa desenvolvida para a geração da GI é resultado da necessidade de desenvolver um método de representação da ionosfera, em tempo real ou quase tempo real, que considere as particularidades do comportamento da ionosfera na região brasileira. No Brasil, vários estudos vêm sendo realizados para entender o comportamento da ionosfera bem como as limitações dos modelos analíticos nesta região, dentre os quais pode-se citar Aguiar et al. (2003), Aguiar e Camargo (2006), Camargo, Monico e Ferreira (2000), Dal Poz, Camargo e Aguiar (2008), Fonseca Junior (2002), Matsuoka e Camargo (2007), Sejas et al. (2010).

Outro fato relevante, devido às características da ionosfera em regiões de baixa latitude, foi a necessidade de se ter um forma de modelar a ionosfera localmente, e não por meio de um ajuste global das observações. Assim, torna-se de suma importância conhecer o impacto da distribuição das estações referência utilizadas para a geração da GI e do GIVE.

Assim, este trabalho apresenta uma análise para definir a resolução espacial mais viável para a GI e para o GIVE, bem como o impacto da distribuição das estações de referência na definição de tal resolução.

## 2. MODELAGEM BASEADA EM GRADE IONOSFÉRICA

Talvez a modelagem de grade mais conhecida, usando rede de estações de referência, é a modelagem sobre rede WADGPS (*Wide Area Differential GPS*), com destaque ao sistema americano WAAS (*Wide Area Augmentation System*) que se trata de um SBAS (*Satellite Based Augmentation System*).

Assim como no DGPS e no WADGPS, o potencial de uso de um SBAS na solução de navegação também é limitado devido ao efeito ionosférico diferencial.

No WAAS, por exemplo, cada estação de referência mede o atraso ionosférico para todos os satélites visíveis a um ângulo de elevação maior do que 20°, usando receptores GPS de dupla frequência. Os atrasos ionosféricos e a localização dos IPP (*Ionospheric Pierce Point* – Pontos Ionosféricos) de todas as estações de referência são enviados para uma estação *master* em tempo real. Na estação *master* os dados são coletados e é realizada uma combinação de todas as informações da ionosfera obtidas a partir das estações de referência. Em seguida são estimados os valores do atraso ionosférico vertical para cada nó (IGP – *Ionospheric Grid Point*) de uma

grade imaginária com espaçamento de 5°x5° fixada na esfera ionosférica. Os valores do atraso vertical e as posições (latitude e longitude) dos IGP's são transmitidos aos usuários dentro da área de cobertura da rede, via satélite de comunicação geoestacionário. O usuário calcula então o atraso ionosférico vertical para o ponto ionosférico, de cada satélite observado, a partir de métodos de interpolação que usam os atrasos verticais dos 4 IGP's vizinhos aos pontos ionosféricos do usuário. Finalmente, o atraso inclinado, na direção receptor/satélite, é calculado pelo produto do atraso ionosférico vertical e da função de mapeamento adotada.

**2.1 Técnicas Usadas para a Interpolação da Grade Ionosférica**

Gao e Liu (2002) utilizando a modelagem de grade, onde a ionosfera é considerada como uma fina camada e a grade com espaçamento de 3°x3°, relacionam o atraso ionosférico inclinado do ponto ionosférico ao atraso vertical dos 4 IGP's vizinhos, pela seguinte equação:

$$I_r^s = sf(el') \sum_{k=1}^4 (I^v)_k p_k, \tag{1}$$

onde:  $I_r^s$  é a medida do atraso ionosférico e  $sf(el') = 1/sen(el')$  é a função de mapeamento considerando o ângulo zenital do satélite ( $el' = 90-z^s$ ), onde  $el'$  é o ângulo de elevação do satélite e  $z^s$  representa o ângulo zenital do caminho do sinal calculado no ponto em que este atravessa a camada ionosférica (IPP); o parâmetro  $(I^v)_k$  denota o atraso ionosférico vertical do k-ésimo IGP que é ponderado pela função peso  $p_k$ , a qual é usada para projetar  $(I^v)_k$  no ponto ionosférico do usuário.

Assim, como a função de mapeamento, a escolha da função peso ( $p_k$ ) é algo arbitrário. Os algoritmos podem ser baseados na média ponderada pelo inverso da distância, inverso do quadrado da distância (KOMJATHY, 1997) interpolação bilinear, *spline* bicúbica, funções de peso multiquádrica (SKONE, 1998), função peso adaptativa (AGUIAR, 2010), entre outros.

Uma fórmula semelhante à Equação (1) para estimar o atraso ionosférico vertical dos IGP's também é usada por Skone (1998):

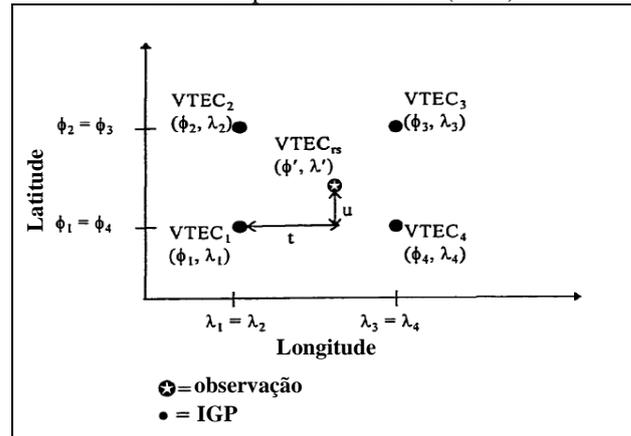
$$TEC_r^s(t_j) = \frac{1}{sf(el')} \sum_{k=1}^4 W_k(t_j) \times VTEC_k(t_j) + b^s + B_r + \varepsilon_{TEC}, \tag{2}$$

onde: a ionosfera é modelada a partir de medidas de  $TEC_r^s(t_j)$  no ponto ionosférico, na época  $t_j$ ;  $VTEC_k(t_j)$  é o valor do atraso vertical dos quatro pontos da grade que circunvizinham IPP;  $W_k(t_j)$  é a função peso que determina a contribuição de cada IGP para determinar o atraso ionosférico do ponto ionosférico do usuário; b e B são, respectivamente, as tendências interfrequência dos satélites e receptores; e o termo  $\varepsilon_{TEC}$  refere-se ao ruído nas medidas de TEC. Para a função peso, Skone (1998) utiliza a interpolação multiquádrica que foi incluída nas especificações do WAAS, em 1994 (USDOT, 2001):

$$\begin{aligned}
 W_1 &= W(1-t, 1-u) \\
 W_2 &= W(1-t, u) \\
 W_3 &= W(t, u) \\
 W_4 &= W(t, 1-u) \\
 W(t, u) &= t^2 u^2 (9 - 6t - 6u + 4tu) \\
 u &= (\phi' - \phi_1) / (\phi_4 - \phi_1) \\
 t &= (\lambda' - \lambda_1) / (\lambda_2 - \lambda_1)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Os parâmetros envolvidos na Equação (3) podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Ponto ionosférico observado e IGP vizinhos.  
Fonte: Adaptada de USDOT (2001).



Komjathy (1997) estima o atraso ionosférico para os IGP aplicando um polinômio onde os três coeficientes ( $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ ) são estimados utilizando o filtro de Kalman:

$$I_{rs}^v(t_k) = a_{0,rs}(t_k) + a_{1,rs}(t_k)d\lambda_{rs} + a_{2,rs}(t_k)d\phi_{rs}, \tag{4}$$

onde:  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  são os coeficientes para aproximação linear espacial do atraso ionosférico na época  $t_k$ ;  $d\lambda_{rs}$  é o termo referente a diferença entre a longitude do ponto ionosférico e a longitude do sol médio; e  $d\phi_{rs}$  é a diferença entre a latitude geomagnética do ponto ionosférico e a latitude geomagnética da estação.

Em termos de SBAS, o modelo usado para a propagação do atraso ionosférico no WAAS e no MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) é semelhante à função dada pela Equação (4) e é denominado de ajuste do plano (*planar fit*) de primeira ordem.

Uma etapa importante para a geração da grade ionosférica é a definição dos IPPs que serão utilizados no processo de interpolação. Para determinar os IPPs que são utilizados para estimar o atraso ionosférico do IGP, defini-se um raio de busca ( $R_{\max}$ ) a partir do IGP. No WAAS e no MSAS é adotado o  $R_{\max} = 2100$  km. Além do raio, também é definido o número mínimo ( $N_{\min}$ ) de IPPs. No caso do WAAS se  $N_{\min} < 10$ , o “ajuste do plano” não é realizado e o IGP é configurado como “não monitorado” (SAKAI et al., 2004). Segundo Blanch (2003), se dentro do  $R_{\max}$  conter mais de 30 medidas de IPPs o raio de busca é reduzido para conter no máximo 30 medidas. No entanto, o raio de busca não deve ser menor do que 800 km. Para a geração do GIVE pode-se aplicar a lei de propagação de variância-covariância (AGUIAR, 2010; CHAO, 1997).

Deve-se salientar que quando se utilizada a grade ionosférica, tem-se uma grande quantidade de informações a serem transmitidas aos usuários, enquanto que nos modelos que não baseados em grade são transmitidos somente os coeficientes das funções de modelagem. Assim, o formato das correções ionosféricas disponíveis por meio de grade é limitado pela mensagem de correção transmitida em sistemas de aumento tal como o SBAS.

Além disto, este tipo de modelagem é muito utilizado para a geração de mapas do TEC, podendo-se citar os produtos gerados pelo IGS e os diversos centros que compõem o grupo de trabalho de ionosfera do IGS.

### 2.3 Modelagem sobre uma Rede WADGPS: Estado Atual no Brasil

Deve-se salientar que estes trabalhos têm como caso de estudo regiões ionosféricas (médias e altas latitudes) com características diferentes daquela sob a qual o Brasil está localizado. 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, que devem ser consideradas para a modelagem e correção do seu efeito no posicionamento e navegação com GNSS.

Como mencionado anteriormente, o WADGPS trata-se de um SBAS e é caracterizado por uma rede esparsa de estações de monitoramento. As estimativas do erro sistemático devido à ionosfera são calculadas usando observações de cada estação da rede WADGPS e então, uma grade de correções ionosféricas é formada e transmitida aos usuários para correção no seu posicionamento local. Vários serviços WADGPS estão em operação ou em desenvolvimento nos Estados Unidos, Europa, Japão, Austrália e Índia, respectivamente: WAAS, EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), MSAS, *Australian Regional Augmentation System* (GRSAS) e *Indian GPS Aided GEO Augmented Navigation*

(GAGAN). O Canadá também desenvolveu um serviço WADGPS referido como *Canada Wide Differential GPS* (CDGPS).

No Brasil, o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) realizou estudos para analisar a viabilidade da implementação de um SBAS. Entretanto, devido aos elevados custos de implantação e minimização do ganho operacional devido às interferências ionosféricas nos sinais GNSS, o SBAS foi considerado inviável. Desta forma, ao considerar a infraestrutura aeronáutica, a frota de aeronaves, as condições meteorológicas, as condições ionosféricas e as tecnologias GNSS, levaram o Brasil a optar por estudar a implementação do ABAS (*Aircraft-Based Augmentation System*) e do GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) (BRASIL, 2011).

Considerando a modelagem baseada em grade ionosférica, utilizando os conceitos de WADGPS, Aguiar (2010) propõe estratégias que apresentaram resultados promissores. 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, uma função de decomposição da camada ionosférica em subcamadas é utilizada para a geração da GI. Desenvolveu-se um algoritmo computacional capaz de estimar o atraso ionosférico vertical em uma grade (GI) que pode ser atualizada continuamente, onde cada IGP 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. Também é apresentada uma estratégia para o controle de qualidade, onde o mesmo é realizado de forma independente para cada arco de satélite.

### 3. METODOLOGIA

A distribuição das estações GNSS de referência tem considerável impacto na geração da grade ionosférica e do GIVE. Desta forma é necessária a análise de alguns parâmetros tais como, a resolução espacial mais adequada e qual a disponibilidade temporal em função da quantidade e da distribuição dos pontos ionosféricos utilizados na geração da grade e do GIVE. Para essa análise foi desenvolvido um aplicativo denominado GS (*Grid Simulator – Simulador de Grade*).

Juntamente com o GS são utilizados dois aplicativos de distribuição gratuita, o GMT (*Generic Map Tools*), disponível em <http://gmt.soest.hawaii.edu/>, e o ImageMagick, disponível em <http://www.imagemagick.org/>. O GMT é um pacote de software que permite gerar mapas, no formato Postscript com alta qualidade, e em diversas projeções. O ImageMagick é uma suíte de aplicativos utilizado para criar, editar ou compor imagens. Assim, o GS também é composto por bibliotecas do GMT e do ImageMagick.

O aplicativo GS é responsável pela análise da distribuição das estações de referência. Em seguida é gerada a base cartográfica digital contendo as informações de densidade da grade utilizando bibliotecas do GMT. Finalmente é utilizada uma biblioteca do ImageMagick, que permite a conversão do formato Postscript para outros formatos, como por exemplo o GIF (*Graphic Interchange Format*).

No experimento foram simuladas observações com intervalo de 15 segundos, ângulo de elevação acima de 15° e grades com resoluções de 1°x1°, 2,5°x 2,5° e 5°x5°. Foi considerada a grade em uma altura média de 400 km.

Para a simulação foram experimentadas duas configurações diferentes de redes, a partir das redes ativas disponíveis no Brasil. Uma configuração da rede foi considerado 85 estações pertencentes à RBMC/RIBaC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo/Rede INCRA de Bases Comunitárias do GNSS) e à Rede GNSS do Estado de São Paulo, tendo em vista a geração da grade num pós processamento. Para o processamento em tempo real, foi analisada a configuração da rede composta por 37 estações considerando a RBMC-IP e a Rede GNSS SP, as quais os dados são transmitidos usando o protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Portanto, considerando as três resoluções de grade e as duas possibilidades de configuração da rede, neste experimento foram analisadas seis combinações (Tabela 1) para a simulação do impacto da distribuição e densidade da rede de estações GNSS na geração da grade ionosférica.

Tabela 1 – Processamentos para análise da densidade de redes ativas disponíveis no Brasil.

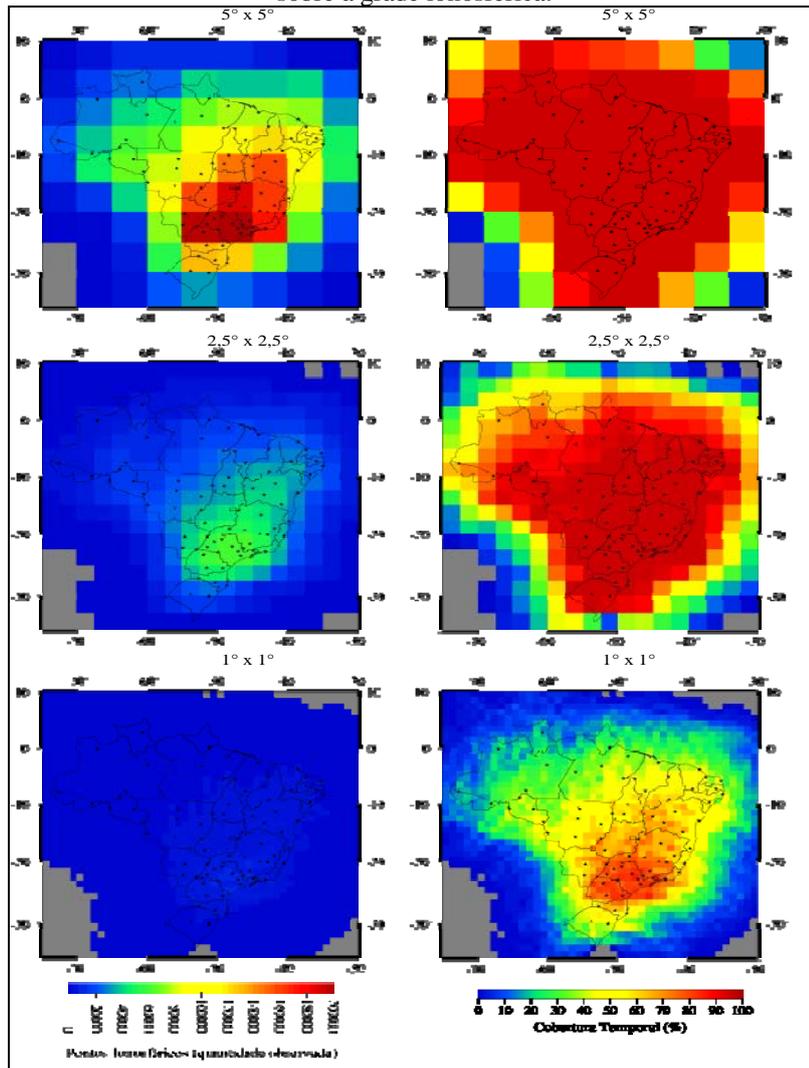
<b>Rede de Referência</b>	<b>Qtde de Estações</b>	<b>Resolução da Grade</b>
RBMC/RIBaC/Rede GNSS SP	85	1° x 1°
		2,5° x 2,5°
		5° x 5°
RBMC-IP/Rede GNSS SP (Tempo Real)	37	1° x 1°
		2,5° x 2,5°
		5° x 5°
		2,5° x 2,5°
		5° x 5°

#### **4. RESULTADOS E ANÁLISE DO IMPACTO DA DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA NA GI**

##### **4.1 Predição para Processamento de Dados *Off-line***

Os resultados considerando as 85 estações de referência, incluindo aquelas que fornecem dados em tempo real e aquelas cujos dados são obtidos após o fechamento de um lote de 24 horas de observação, são apresentados nos mapas da Figura 2.

Figura 2 – Impacto da distribuição das estações RBMC/RIBaC/Rede GNSS SP sobre a grade ionosférica.



Na Figura 2, os mapas do lado esquerdo mostram a quantidade de pontos ionosféricos incidentes em cada célula da grade, em um período de 24 horas. Os mapas do lado direito mostram a cobertura temporal de cada célula da grade, ou seja, mostra o período em que há pelo menos um ponto ionosférico incidente em cada célula, para o período de 24 horas. Os mapas localizados na parte superior da

figura mostram a análise para uma grade com espaçamento de 5° em latitude e 5° em longitude, na parte central são apresentados os resultados para grade com espaçamento de 2,5° em latitude e 2,5° em longitude, e finalmente na parte inferior da figura são apresentados os resultados para a grade com resolução de 1° x 1°. Este padrão de figura também será adotado para as análises subsequentes. Os pixels em tons de cinza mostram células da grade onde não há disponibilidade de dados.

Observando-se os mapas do lado esquerdo da Figura 2 nota-se que um maior número de pontos ionosféricos está disponível na região sudeste do país, em uma latitude geomagnética média de -19,0°, onde a combinação RBMC/RIBaC/Rede GNSS SP é mais densa. Verifica-se ainda que a densidade de pontos ionosféricos diminui consideravelmente a medida que se afasta para as outras regiões do país, principalmente nas regiões norte e extremo Sul onde a rede apresenta poucas estações e esta situação torna-se mais crítica com o aumento da resolução espacial da grade. Este problema na região norte pode ser amenizado com a expansão da RBMC/RIBaC.

Os mapas da quantidade de pontos ionosféricos a serem utilizados no cálculo do IGP, não dão ideia da disponibilidade temporal de pontos observados em cada célula. Este é um fator importante para minimizar o vetor dos resíduos em cada IGP estimado, tendo em vista que se houver, em cada época, pelo menos uma observação próxima do IGP, esta observação será altamente correlacionada com o mesmo, considerando um dado raio com baixo gradiente espacial.

Logo, a análise da disponibilidade temporal dos dados é apresentada nos mapas do lado direito da Figura 2. Nestes mapas, para uma grade de 5°x5°, nota-se que quase todas as células que cobrem o Brasil terão pelo menos um ponto ionosférico observado em mais de 98,5% do tempo, ou seja, dentro de um período de 24 horas a célula da grade terá pelo menos um ponto a ser observado na vizinhança durante aproximadamente 23,6 horas.

Observa-se ainda que com o aumento da resolução espacial da grade esta disponibilidade temporal diminui gradativamente, chegando a aproximadamente 80%, na melhor situação, em algumas células numa grade de 1°x1°. Isto significa que das 24 horas de observação, em apenas 19,2 horas (melhor situação) haverá pelo menos um ponto ionosférico observado nas proximidades do IGP. Nas regiões de pior desempenho, a cobertura temporal chega a valores menores que 5%, ou seja, um período de observação de aproximadamente 1,20 horas. Para a grade de 2,5°x2,5°, o período de disponibilidade varia de aproximadamente 40% (9,6 horas), nas bordas da área de cobertura da rede, até 97,5% (23,4 horas), nas regiões mais a leste onde a rede é mais densa.

Dos resultados apresentados na Figura 2, pode-se concluir que utilizando as 85 estações da RBMC/RIBaC/Rede GNSS SP pode-se obter uma cobertura temporal em torno de 98,5% em quase todo o território nacional, quando se utiliza uma grade com resolução de 5°x5°. Ao se utilizar uma grade de 2,5° de resolução espacial, tem-se uma cobertura temporal entre 80% e 97,5% em grande parte do território

nacional. Para a resolução espacial de  $1^\circ$  apenas uma pequena área na região sudeste do país é coberta durante 80% do tempo.

Também se conclui que para a configuração atual da RBMC/RIBaC/Rede GNSS SP, a disponibilidade de dados seria garantida em aproximadamente 98,5% do período de processamento, em quase todo território nacional, utilizando-se uma grade com resolução espacial de  $5^\circ$ . No entanto, esta resolução pode ser um fator limitante na acurácia dos valores do atraso ionosférico dos IGP's devido ao gradiente ionosférico espacial.

Pode-se concluir ainda que, considerando a configuração atual das redes disponíveis no Brasil, a densificação da rede de referência terá maior impacto quando se pretende gerar grades ionosféricas com resolução espacial maior do que  $2,5^\circ$ .

#### **4.2 Predição para Processamento de Dados *On-line***

Para a simulação da geração da grade ionosférica em tempo real, foram consideradas 27 estações de referência que compõem a RBMC-IP e 10 estações da Rede GNSS SP. Os resultados são apresentados na Figura 3.

Nos mapas da Figura 3, pode-se verificar que a composição atual da RBMC-IP e da Rede GNSS SP permite realizar observações de pontos ionosféricos sobre todo o território nacional, principalmente na região sudeste, devido à presença de um número maior de estações.

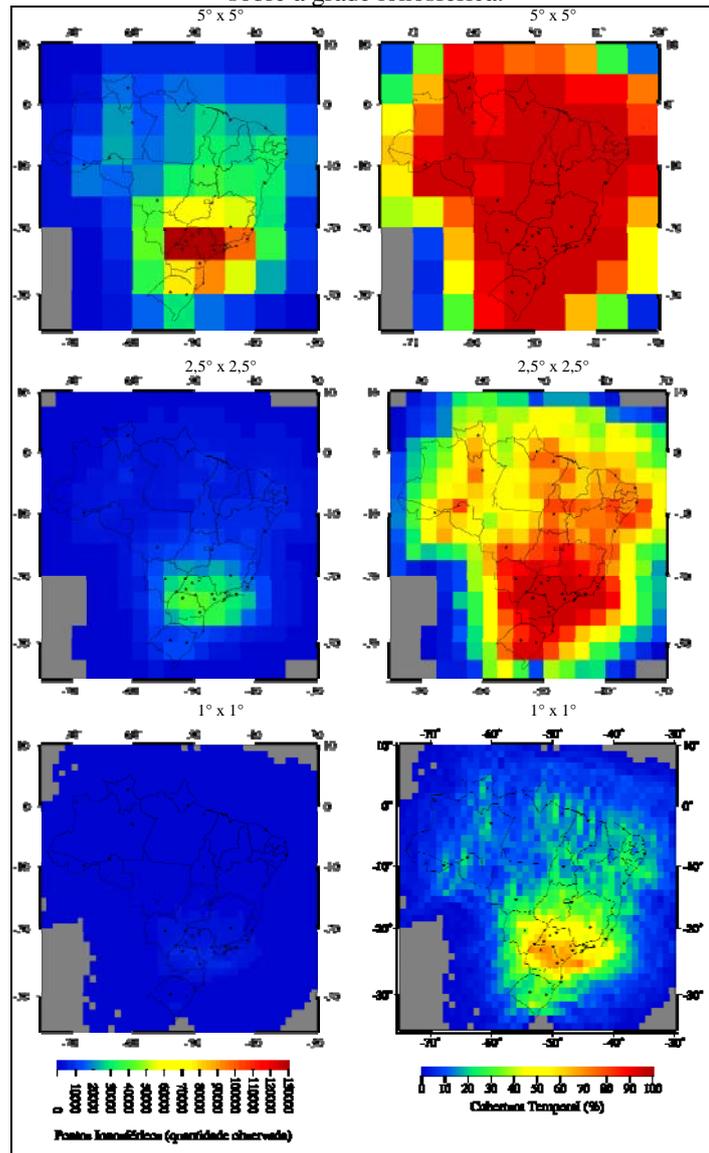
Já nos mapas do lado direito da mesma figura, para uma grade ionosférica de  $5^\circ$  de resolução espacial, quase toda a região brasileira terá um ponto ionosférico observado em 95% do tempo, e na região sob a influência da Rede GNSS SP esta cobertura chega a aproximadamente 98% do tempo.

Para a grade de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ , o período de disponibilidade varia de aproximadamente 25% (6 horas), no pior caso, a 97% (23,3 horas), na melhor situação. Observa-se ainda que aproximadamente 70% da região brasileira tem uma cobertura temporal entre aproximadamente 50% e 80% do tempo.

Na grade com resolução espacial de  $1^\circ$ , a célula com melhor cobertura temporal de pontos ionosféricos apresenta um período de observação de aproximadamente 71% do tempo, ou seja, nesta célula haverá no mínimo um ponto ionosférico observado durante 17 horas. Nas demais células da grade, que cobrem a região brasileira, a disponibilidade temporal dos dados varia entre, aproximadamente, 3% e 58%.

Dos resultados apresentados na Figura 3, pode-se concluir que para a geração da grade ionosférica em tempo real, considerando a atual configuração das redes RBMC-IP e Rede GNSS SP, será obtida uma melhor cobertura temporal de dados utilizando uma grade ionosférica de  $5^\circ \times 5^\circ$ . No entanto, estudos futuros devem ser realizados para verificar o quanto o gradiente espacial da ionosfera irá degradar a acurácia da GI.

Figura3 – Impacto da distribuição das estações da REDE GNSS SP e da RBMC-IP sobre a grade ionosférica.



### 4.3 Análises da Distribuição Ideal para as Estações para Suporte a GI

Das análises realizadas nos experimentos, pode-se verificar também a influência da distância entre as estações de referências sobre os resultados obtidos.

A partir dos mapas apresentados, uma simulação considerando a distribuição homogênea e a distância média entre as estações das redes ativas disponíveis no Brasil, para uma grade ionosférica com resolução de  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ , mostra que o espaçamento entre as estações de aproximadamente 600 km é suficiente para uma cobertura temporal próxima a 100%. Para a grade ionosférica com resolução espacial de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  um espaçamento entre as estações de referência de aproximadamente 250 km garante uma cobertura temporal acima de 97%. Para uma grade com resolução espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  o espaçamento médio de 100 km entre as estações de referência permite uma cobertura temporal de aproximadamente 80%. Logo, para uma cobertura temporal próxima a 100% deve-se pensar em estações de referência com espaçamento menor do que 100 km, para garantir que em cada célula com  $1^{\circ}$  de resolução tenha pelo menos um ponto ionosférico observado em cada instante, durante todo o período de observação.

A partir das análises realizadas pode-se definir a configuração de rede mais adequada para as diferentes resoluções da grade da ionosfera. A Tabela 2 apresenta os resultados da simulação considerando a distribuição homogênea e a configuração de rede indicada para gerar grades ionosféricas com resoluções de  $1^{\circ}$ ,  $2,5^{\circ}$  e  $5^{\circ}$ , bem como a quantidade de estações necessárias para a implantação da rede.

Tabela 2 – Configuração da rede em função da resolução da grade ionosférica.

<b>Distância entre Estações</b>	<b>Resolução da Grade Ionosférica</b>	<b>Número de Estações</b>
100 km	$1^{\circ} \times 1^{\circ}$	724
250 km	$2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$	148
600 km	$5^{\circ} \times 5^{\circ}$	30

Com base na quantidade de estações de referência, também se pode fazer uma análise de custos para a implantação de uma rede GNSS ativa. Os resultados mostram a importância de se ter estações implantadas de forma planejada e com distribuição homogênea.

## 5. DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados pôde-se observar que a distribuição planejada das estações tem tanta importância quanto à densificação da rede. É importante destacar também a dificuldade em instalar as estações em locais adequados em termos de acesso, segurança e infra-estrutura. Estes fatores limitantes são mais acentuados na região norte do país.

Pela análise dos resultados, no caso do pós processamento, pode-se concluir que para a atual configuração da RBMC/RIBaC/Rede GNSS SP, deve-se utilizar

uma grade ionosférica com resolução de 5°, a qual permite garantir uma disponibilidade das informações de atraso ionosférico durante aproximadamente 98,5% do tempo.

Para aplicações em tempo real, utilizando a RBMC-IP e a Rede GNSS SP os melhores resultados também são esperados para a grade com resolução espacial de 5° a qual garante uma disponibilidade de aproximadamente 95% do tempo. No Estado de São Paulo, devido a influência da Rede GNSS SP, pode-se adotar uma grade de até 2,5° de resolução a qual permite uma cobertura temporal de 97%.

Também se conclui que para a configuração atual da RBMC/RIBaC/Rede GNSS SP, a disponibilidade de dados seria garantida em aproximadamente 98,5% do período de processamento, em quase todo território nacional, utilizando-se uma grade com resolução espacial de 5°.

Como pode ser observado nos mapas apresentados, a distribuição e a distância entre as estações de referência têm impacto direto sobre a modelagem da ionosfera, bem como na geração da grade ionosférica. Os resultados estão sendo analisados em função do objetivo de gerar uma grade ionosférica. No entanto, uma rede com distribuição planejada e homogênea é importante não somente para a modelagem da ionosfera, mas também é importante para ser utilizada como estrutura básica de um SBAS, além de outras aplicações tal como o mapeamento, determinação de campo de velocidade, entre outros.

#### **AGRADECIMENTOS:**

Os autores agradecem a FAPESP pela concessão de bolsa de doutorado (Processo n° 0438-2/2006) e ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa - PQ (Processo n° 309332/2007-9).

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 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.; 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.
- BLANCH, J.; WALTER, T.; ENGE, P. Adapting Kriging to the WAAS MOPS Ionospheric Grid. In: *2003 National Technical Meeting Proceedings*, Anaheim, California. 2003.

- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. *Concepção Operacional ATM Nacional (DCA 351-2)*. Portaria N°. 630/GC3, de 01 de dezembro de 2011.
- BRUNINI, C.; AZPILICUETA, F.; GENDE, M.; ARAGÓN-ÁNGEL, A.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.. toward a SIRGAS service for mapping the ionosphere's electron density distribution. In: *Proceedings of the International Association of Geodesy Scientific Assembly 2009*. 2010.
- CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; FERREIRA, L. D. D. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth, Planets and Space*, Japão, v.52, n.11, p.1083-1089, 2000.
- CHAO, Y.C. *Real Time Implementation of the Wide Area Augmentation System for the Global Positioning System with an Emphasis on Ionospheric Modeling*. 1997. 140 f. Ph.D. Dissertation – Department Aeronautics and Astronautics, Stanford University.
- DAL POZ, W. R. ; CAMARGO, P. O. ; AGUIAR, C. R. . Período de mínima atividade solar: melhora no desempenho do posicionamento relativo. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 14, p. 35-54, 2008.
- FONSECA JUNIOR, E. S. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. 2002. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GAO, Y.; LIU, Z. Z. Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data. *Journal of Global Positioning Systems*, v.1,n.1, jul. 2002. p.18-24.
- GIM – Global Ionosphere Maps by CODE. Universität Bern: CODE (Center for Orbit Determination in Europe) online, 2012. < <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/>>. Acesso em: 25 jun. 2012.
- 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.
- 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.
- POWELL, J. D.; WALTER, T. Space Wather: Its Effect on GNSS, DGNSS, SBAS and Flight Inspection. In: *International Flight Inspection Symposium (IFIS)*, Beijing, China, jun. 2010.
- RADICELLA, S. M. The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution. In: *Annals of Geophysics*, vol. 52, n. ¾, p. 417-422, jun./aug. 2009.

- SAKAI, T.; MATSUNGA, K.; HOSHINO, K.; WALTER, T. Evaluating Ionospheric Effects on SBAS in the Low Magnetic Latitude Region. In: *Proceedings of the 17th Int'l Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS)*, Logn Beach, CA, sep. 2004, p.1318-1328.
- SEO, J. *Overcoming Ionospheric Scintillation for Worldwide GPS Aviation*. 2010. 136f. Ph.D Dissertation – Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.
- SEJAS, M. I.; KRUEGER, C. P.; HECK, B. Avaliação de um modelo ionosférico local em redes GPS: estudo de caso para um período de baixa atividade solar. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 16, n. 2, p.253-276, abr-jun, 2010.
- SKONE, S. *Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region*. 1998. 198 f. Ph.D Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20123, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- USDOT. US Department of Transportation Federal – *Federal Aviation Administration Specification for the WAAS*. Doc. DTFA01-96-C-0025, 2001. 155p.

(Recebido em outubro de 2010. Aceito em agosto de 2012.)