



**Análise da Performance dos Mapas Globais e Regionais da Ionosfera
para Geração de Estação de Referência Virtual**
Performance Analysis of Global and Regional Ionosphere Maps
for Generation of Virtual Reference Station

Mayara Cobacho Ortega Caldeira¹; Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira¹;
Daniele Barroca Marra Alves² & Claudinei Rodrigues de Aguiar³

¹Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Ciberespacial, Avenida
Presidente Tancredo Neves, 2501, 66077-830, Belém, PA, Brasil

²Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Departamento de
Cartografia, Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900, Presidente Prudente, SP, Brasil

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Coordenação de Engenharia Civil,
Rua Marcílio Dias, 635, 86812-460, Apucarana, PR, Brasil

E-mails: mayara.caldeira@ufra.edu.br; carlos.caldeira@ufra.edu.br; daniele.barroca@unesp.br; rodriguesaguiar@utfpr.edu.br

Recebido em: 22/05/2020 Aprovado em: 02/10/2020

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_413_425

Resumo

Uma grande tendência nos últimos anos tem sido o emprego do método *Real Time Kinematic* (RTK), devido a acurácia centimétrica e produtividade. Entretanto, o RTK fica restrito a aplicações de linha de base inferiores a 20 km. Para superar este problema, vem sendo empregado o conceito de rede de estações de referência, denominado posicionamento baseado em redes. Porém, tanto no uso de redes como nos demais métodos, um fator importante para melhorar a qualidade do posicionamento está relacionado com a modelagem ionosférica, uma vez que este erro, varia no tempo e no espaço, e sofre diversas influências, como: ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica, atividade geomagnética, entre outros. Atualmente, os erros proporcionados pela ionosfera podem ter seus efeitos minimizados a partir de Mapas Ionosféricos. Deste modo, nesta pesquisa, analisou-se o desempenho dos Mapas Globais e Regionais da Ionosfera disponibilizados pelo *International Service GNSS* (IGS) e pelo projeto *Monitoring the Ionosphere Over South America* (MImOSA), respectivamente, no posicionamento em redes, utilizando o conceito de *Virtual Reference Station* (VRS). De acordo com os resultados obtidos, nota-se que a acurácia obtida empregando o Mapa Regional do projeto MImOSA, que possui maior resolução espacial e temporal, foi o que apresentou os melhores resultados.

Palavras-chave: *Mapas Globais da Ionosfera (GIM); IONEX; MImOSA*

Abstract

An important tendency in recent years has been the use of the *Real Time Kinematic* (RTK) method, due to centimeter accuracy and productivity. However, the RTK is restricted to applications with a baseline below 20 km. To overcome this problem, concept of network of reference stations, called network-based positioning, has been used. However, both in use of networks and in other methods, an important factor to improve quality of positioning is related to ionospheric modeling, since this error, varies in time and space, and suffers several influences, such as: solar cycle, time of year, local time, geographic location, geomagnetic activity, among others. Currently, the errors caused by the ionosphere can have their effects minimized from IONEX files. Thus, in this research, the performance of the Global and Regional Ionosphere Maps made available, by International Service GNSS (IGS) and Monitoring the Ionosphere Over South America (MImOSA) project respectively, in positioning in networks, was analyzed, using the concept of *Virtual Reference Station* (VRS). According to the results obtained, observe there is accuracy in the use of the Regional Map of the MImOSA project, which has greater spatial and temporal resolution, and which presents the best results.

Keyword: *Global Ionosphere Maps; IONEX; MImOSA*

1 Introdução

Um dos métodos do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) mais empregado atualmente, visando alta acurácia e produtividade é o posicionamento relativo cinemático em tempo real, denominado *Real Time Kinematic* (RTK), sendo capaz de alcançar acurácia centimétrica (Alves, 2008). Entretanto, em razão dos erros envolvidos no processo, o RTK fica restrito a aplicações com distâncias inferiores a 20 km entre a estação-base e a estação-móvel, dependendo, principalmente, das condições ionosféricas (Monico, 2008).

Para superar esta limitação, vem sendo empregado o conceito de rede de estações de referência, denominado RTK em Rede ou, simplesmente, posicionamento baseado em redes, devido à necessidade de uma melhor disponibilidade, acurácia e confiabilidade no posicionamento (Alves, 2011). Neste contexto, a FCT/UNESP vem sendo desenvolvido um sistema de caráter científico para realizar RTK em Rede que utiliza o conceito de *Virtual Reference Station* (VRS) no modo pós-processado, denominado VRS-Unesp (Alves, 2011).

Assim como em todos os outros métodos de posicionamento, a ionosfera deve ser modelada de forma adequada para atingir a acurácia centimétrica almejada (Monico, 2008), já que se tornou a principal fonte de erro sistemático no posicionamento GNSS para receptores de simples frequência, após a desativação da técnica *Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva (SA) em maio de 2000 (Seeber, 2003; Matsuoka, 2007).

No entanto, a magnitude do erro devido ao efeito ionosférico nos sinais GNSS depende diretamente do Conteúdo Total de Elétrons (do inglês *Total Electron Content* (TEC) presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal, que por sua vez está relacionado ao processo de ionização na ionosfera, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal (Camargo, 1999; Matsuoka, 2007). O TEC e, conseqüentemente, o erro ionosférico variam no tempo e no espaço e sofrem diversas influências, como: ciclo solar (aproximadamente 11 anos); estação do ano; hora local; localização geográfica; atividade geomagnética; entre outros (Fedrizzi, 1999).

Além disso, por se tratar de um meio dispersivo, o sinal apresenta um comportamento diferente para frequências distintas, e nesse sentido os receptores de dupla frequência possuem suas vantagens já que minimizam os efeitos de primeira ordem da ionosfera, através da combinação *Ion-free* (Monico, 2008). Todavia, os efeitos de segunda e terceira ordem não são eliminados, conforme visto por Marques *et al.* (2014), e a não correção desses efeitos, pode acarretar em erros residuais nas coordenadas geodésicas.

Por isso, vários modelos foram e ainda vêm sendo desenvolvidos para mitigar este efeito, a fim de melhorar a

acurácia do posicionamento. Um destes modelos amplamente empregados são os mapas ionosféricos, tanto globais quanto regionais, pois são disponibilizados por diversos Centros no formato *IONosphere map EXchange* (IONEX). No que concerne aos Mapas Globais, o *International GNSS Service* (IGS) tem um grupo de trabalho para desenvolver modelos adequados para a geração de arquivos (Aguiar, 2010). No entanto, a precisão média dos valores de *Vertical TEC* (VTEC) fornecidos nos arquivos IONEX varia em função da localização, e principalmente do número de estações GNSS utilizadas, entre outros fatores (Monico, 2008). Na América do Sul e, principalmente no Brasil onde os efeitos ionosféricos são mais recorrentes, é pouco densificada.

Desta forma, existe um grande interesse em desenvolver mapas regionais para um posicionamento mais preciso. Em um contexto mais regional, pode-se citar o Centro de Análise Ionosférica do SIRGAS, além de projetos internacionais, como MIMOSA, financiado pela *European Space Agency* (ESA).

Desse modo, esta pesquisa apresenta uma comparação entre os Mapas Globais e Regionais, fornecidos pelo IGS e projeto internacional *Monitoring the Ionosphere Over South America*, respectivamente para geração das Estações de Referência Virtual em período de alta e baixa densidade de elétrons no pico do ciclo solar 24 (2014), bem como uma tempestade solar de grande magnitude em 2015.

1.1 Posicionamento Baseado em Redes e VRS

Uma das principais vantagens dos usuários de redes de estações de referência, quando comparado a usuários de uma simples linha de base, é o aumento na confiabilidade e disponibilidade do serviço, pois se uma ou duas estações de referência falharem ao mesmo tempo (por qualquer motivo), as estações de referência remanescentes ainda seriam capazes de prover aos usuários as correções (Fotopoulos, 2000; Alves, 2008). Além disso, segundo Alves (2008), o uso da rede permite que a qualidade das correções geradas para cada estação de referência seja verificada com as remanescentes. Assim, se uma estação particular está gerando correções errôneas, o uso da rede permite uma possível detecção e eliminação desse erro para a solução final (Alves, 2011).

Outro fato importante que vem fortalecendo e viabilizando o posicionamento com múltiplas estações é a existência de redes de estações de referência ativas pelo mundo todo. Além disso, permite a modelagem dos erros espacialmente correlacionados, como o efeito ionosférico e a refração troposférica (Monico, 2008). No entanto, de acordo com Fotopoulos (2000), existem algumas desvantagens associadas ao uso de uma rede de estações de referência, pois pode existir um possível aumento da carga

de transmissão dos dados (correções) e complexidade na implementação dependendo do método empregado. Um dos métodos utilizado para superar este problema é a VRS, pois este método combina todas as observações da rede em uma estação central de processamento, e então transmitir para o usuário as correções da rede ou observações de uma estação de referência virtual (VRS) próxima ao usuário (Hu, 2003; Monico, 2008).

Para utilizar o conceito de VRS (Figura 1), os dados das estações de referência são enviados para um computador do centro de controle via uma rede de comunicação e quando se deseja gerar uma VRS para um determinado usuário, a localização aproximada do usuário deve ser transmitida para este centro de controle (Hu, 2003; Alves, 2008). Dessa forma, um *link* de comunicação bi-direcional entre o usuário e o controle central deve ser estabelecido (Alves *et al.*, 2003). Esse computador, juntamente com *softwares* apropriados, utilizam os dados das estações de referência para modelar os erros sistemáticos (que limitam a acurácia do posicionamento GNSS) e geram correções apropriadas para serem utilizadas na área de abrangência da rede (Euler *et al.*, 2001; Alves *et al.*, 2003; Alves, 2008).

O computador do centro de controle gera as observações dessa estação virtual e as envia para o usuário, que pode realizar o posicionamento relativo utilizando a VRS, como se fosse uma estação de referência nas suas proximidades, ou seja, a ideia básica do conceito de VRS é gerar uma estação que não existe fisicamente, mas que simule uma estação base próxima ao usuário (Euler *et al.*, 2001).

Outra possibilidade é utilizar o conceito de VRS no modo pós-processado. Nesse caso, os dados da VRS podem ser gerados diretamente no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), tal conceito é empregado no sistema VRS_Unesp (Alves, 2011).

1.2 Ionosfera e seus Efeitos no Posicionamento

A radiação solar causa a fotoionização da atmosfera terrestre nas altas altitudes, criando, na atmosfera superior, regiões com alta densidade de elétrons livres capazes de afetar a propagação de ondas de rádio, tais como as transmitidas pelos satélites GNSS (McNamara, 1991). Esta camada é denominada de ionosfera, limitada por 50 a 1000 km de altura (Monico, 2008). A ionosfera é um meio dispersivo para a faixa de frequência GNSS, afetando a modulação e a fase da onda portadora, fazendo com que sofram, um retardo e um avanço, respectivamente (Camargo, 1999).

Como já mencionado, a magnitude do erro devido à ionosfera sobre os sinais GNSS depende diretamente do TEC presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal, que por sua vez está relacionado ao processo de ionização na ionosfera (Matsuoka, 2007) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência (Monico, 2008). No entanto, o TEC e consequentemente o erro varia no tempo e espaço, e sofre diversas influências, como, hora local, época do ano, ciclo solar (aproximadamente 11 anos), localização

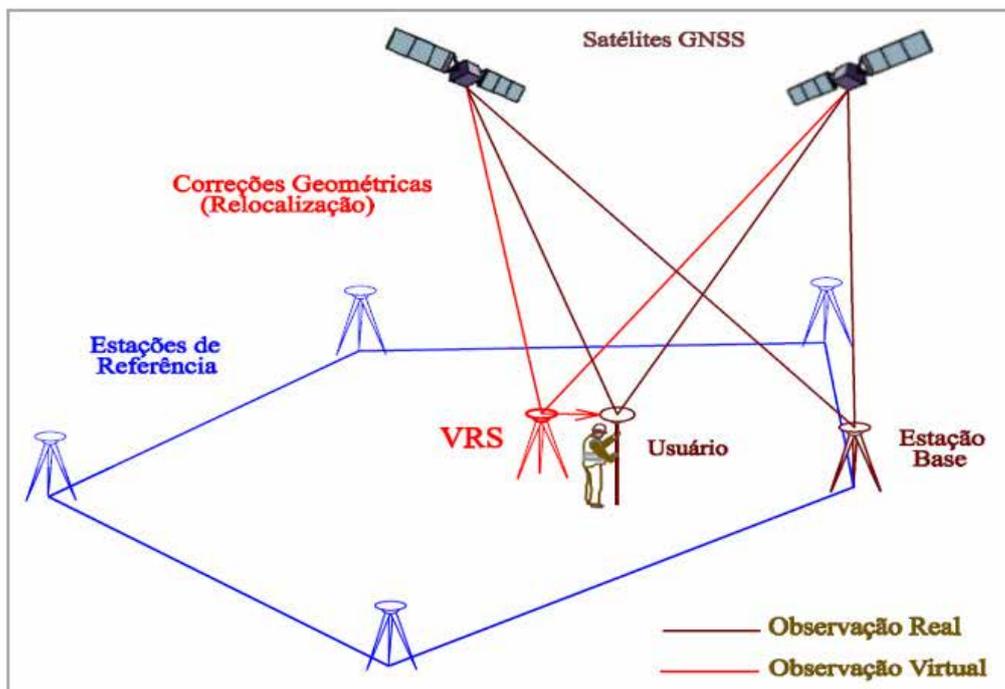


Figura 1 Conceito de Estação de Referência Virtual. Fonte: Alves (2011).

geográfica, atividade solar e campo geomagnético, entre outros (Fedrizzi, 1999).

As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em algumas regiões da ionosfera, que por sua vez desaparecem à noite, devido à recombinação e junção dos elétrons e íons (Mcnamara, 1991; Camargo, 1999). Ao longo do dia a densidade de elétrons depende da Hora Local (HL), sendo que seu valor máximo ocorre entre 15 a 19 UTC, ou seja 12 a 16 HL, com pico próximo as 14 HL (Matsuoka, 2007).

A densidade de elétrons na ionosfera varia durante os meses do ano devido a variação sazonal do ângulo zenital do Sol, bem como, a intensidade do fluxo de ionização (Mcnamara, 1991). No hemisfério sul, valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de equinócio, sendo eles, março, abril, setembro e outubro, e os valores mínimos ocorrem nos meses de solstícios de inverno e verão (Matsuoka, 2007; Monico, 2008).

No que concerne às variações de ciclos de longos períodos com duração de aproximadamente 11 anos, são associadas as ocorrências de manchas solares, que são regiões mais frias e escuras que aparecem na superfície do Sol (Camargo, 1999). O aumento do número destas manchas intensifica a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (Langley, 2011). Estes ciclos são definidos com relação ao número de manchas solares, atualmente, se encontra o fim do ciclo solar 24, cujo o pico ocorreu em 2014.

Outro aspecto importante é o fato que a estrutura global da ionosfera não é homogênea. Ela muda com a latitude geomagnética, devido à variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação solar (Ram *et al.*, 2009). A Figura 2 apresenta a localização das três maiores regiões geográficas da ionosfera: equatorial, polar e latitude média. As regiões equatoriais delimitadas aproximadamente pelas latitudes 20° S e 20° N são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons. Já, as regiões de latitudes médias, delimitadas entre a latitude de $\pm 20^\circ$ a $\pm 60^\circ$, são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, enquanto as regiões polares, delimitadas entre a latitude de $\pm 60^\circ$ a $\pm 90^\circ$, não são muito previsíveis (Camargo, 1999; Matsuoka, 2007).

Por consequência da constante iluminação direta do Sol e das altas temperaturas, o vento solar é composto totalmente por plasma ionizado, diferentemente da ionosfera terrestre, que contém também elementos neutros (Matsuoka, 2007). Isso faz com que, constantemente, a Terra seja atingida por plasma quente, magnetizado, com considerável quantidade de energia cinética e elétrica, capaz de conduzir corrente (Fedrizzi, 1999; Langley, 2011).

Portanto, os eventos solares alteram os parâmetros do vento solar, como velocidade e densidade, e consequentemente, provoca uma alteração no campo geomagnético, que por sua vez contribuem para a ocorrência das tempestades geomagnéticas (Mcnamara, 1991). As tempestades geomagnéticas mais intensas são frequentemente relacionadas com as *Coronal Mass*

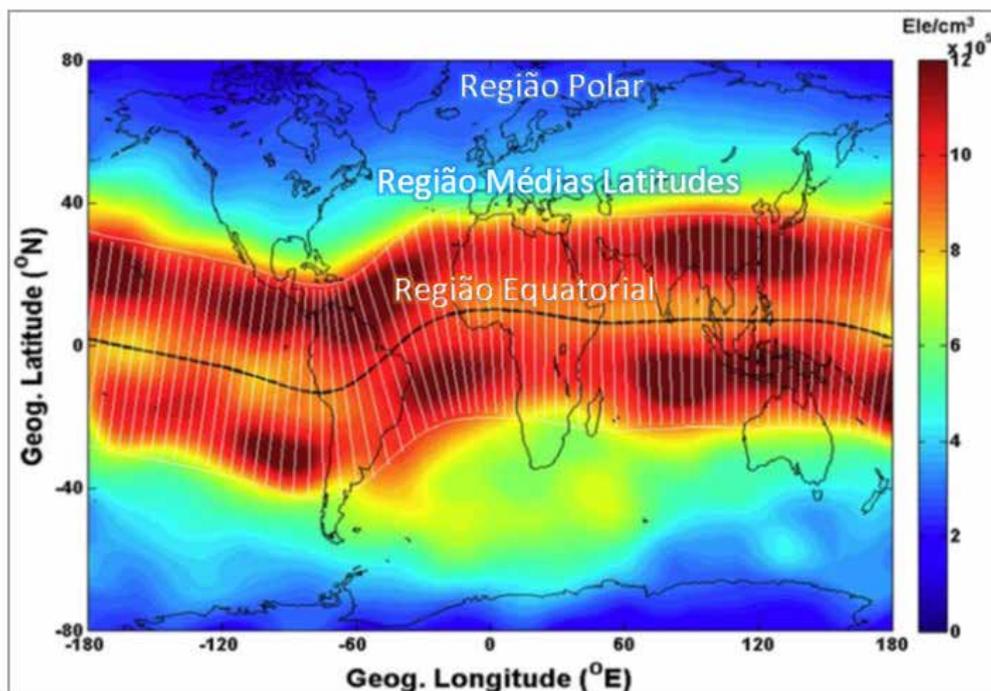


Figura 2 Regiões Geográficas da Ionosfera. Fonte: Adaptado de Ram *et al.* (2009).

Ejections (CME) e *Solar Flares* (Fedrizzi, 2003). Os distúrbios geomagnéticos provocados por eventos solares são monitorados pelas estações em Terra, instaladas em observatórios magnéticos.

Frequentemente, são utilizados índices geomagnéticos para determinar a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas, como o índice *Disturbance Storm-Time* (Dst – Quadro 1), *Planetarische Kennziffer*, ou índice planetário (Kp - Quadro 2). Estes índices constituem em uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética, ou alguns de seus componentes (Fedrizzi, 2003).

Condição da Tempestade	Geomagnética Valor do índice Dst (nT)
Fraca	-30 nT a -50 nT
Moderada	-50 nT a -100 nT
Intensa	-100 nT a -250 nT
Muito Intensa	<-250 nT

Quadro 1 Classificação de uma tempestade geomagnética de acordo com Índice Dst. Fonte: Fedrizzi (2003).

Atividade Geomagnética	Valor do índice Kp
Muito Calmo	0 a 1
Calmo	1 a 2-
Normal	2- a 3+
Perturbado	3+ a 4+
Muito Perturbado	4+ a 9

Quadro 2 Condições da atividade geomagnética de acordo com os índices Kp. Fonte: Fedrizzi, 2003.

Como mencionado, devido à alta radiação solar na região equatorial e aos campos magnético e elétrico da Terra, a densidade de elétrons na ionosfera nesta região sofre irregularidades (McNamara, 1991; Oliveira, 2003). Após a subida do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o plasma inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo geomagnético, devido à ação da gravidade e gradiente de pressão (Ram *et al.*, 2009). Este movimento de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte (Oliveira, 2003; Matsuoka, 2007).

Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e subsequente descida do plasma é que duas regiões de picos de densidade de elétrons são formadas nas regiões subtropicais entre $\pm 10^\circ$ e $\pm 20^\circ$ de latitude geomagnética, tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial (Ram *et al.*, 2009). Como resultado

para o posicionamento GNSS é que altos valores de TEC estão presentes nas regiões de baixas latitudes, e altos gradientes de TEC podem ocorrer na direção norte-sul, afetando a qualidade tanto do posicionamento por ponto quanto do relativo (Aquino *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2012; Vani, 2013).

Além disso, as irregularidades na ionosfera da Terra podem produzir variações de curtos períodos nos sinais, provocadas por rápidas flutuações na fase e amplitude, devido aos efeitos da difração e refração, que causam um enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GNSS, fazendo com que ocorra a perda do sinal (Conker *et al.*, 2003; Rodrigues, 2003; Matsuoka, 2007). Essas rápidas flutuações são chamadas de cintilação ionosférica e, normalmente, as irregularidades do TEC que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altitude (Conker *et al.*, 2003; De Paula *et al.*, 2008; Mendonça, 2013). De acordo com Davies (1990), um sinal de rádio que atravessa a ionosfera será modificado por irregularidades do tamanho de poucos metros até quilômetros, podendo se tornar um problema severo ao ponto de inviabilizar o rastreamento do sinal.

1.3 Mapas Ionosféricos

Em 1998 o IGS iniciou a produção de Mapas da Ionosfera, fornecendo valores do VTEC calculados a partir dos dados de receptores de dupla frequência da rede IGS (Aguiar, 2010). Os mapas, disponibilizados no formato IONEX, fornecem valores de VTEC em uma grade com resolução espacial de $5^\circ \times 2,5^\circ$ em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas e tempo de latência de 11 dias (IGS, 2019).

O IGS apresenta um grupo de trabalho para desenvolver modelos para serem utilizados, e atualmente quatro centros de análise do IGS produzem estimativas do *Global Ionosphere Maps* (GIM) ou Mapas Globais da Ionosfera no formato IONEX, sendo eles, o *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE), *European Space Operations Center* (ESOC), *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) e *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC) (Aguiar, 2010; ION, 2019). Desde 2002, para cada dia, os arquivos IONEX produzidos por cada um dos centros de análise são combinados para gerar um único arquivo IONEX, resultando então em cinco arquivos diários (Matsuoka & Camargo, 2002; Aguiar, 2010). No entanto, a precisão média dos valores de VTEC fornecidos nos arquivos IONEX varia em função da região do globo, do número de estações GNSS utilizadas, entre outros fatores (Monico, 2008; Aguiar, 2010). Na América do Sul e, principalmente, no Brasil, a rede IGS é pouco densificada.

Em um contexto mais regional, pode-se citar o projeto MIMOSA que avaliou a capacidade dos países da

América do Sul em monitorar e investigar a ionosfera, a partir de instalações existentes e de novos sistemas GNSS para dar suporte a aplicações que requerem alta precisão. A capacidade multi-GNSS permitiu gerar mapas ionosféricos com uma resolução espacial e temporal suficientes para representar os efeitos causados pelas irregularidades ionosféricas de forma mais precisa (MImOSA, 2019). Estes mapas abrangem o estado de São Paulo (cobrindo latitude de 23,21°S a 22,12°S e longitude de 41,79°W a 51,41°W), a partir de uma rede densa das estações CIGALA/CALIBRA (<http://ismrquerytool.fct.unesp.br/is/>) garantindo assim, uma boa cobertura. Os mapas, fornecem valores de VTEC em uma grade com resolução espacial de 1° x 1° em longitude e latitude, respectivamente, e uma resolução temporal de 5 minutos (Alfonsi *et al.*, 2015). Além disso, empregam três métodos de interpolação diferente, conforme explicita Alfonsi *et al.* (2015):

- *Lowees*: método não paramétrico baseado na interpolação local por meio de suavização das curvas;
- *Natural Neighbor*: uma generalização do método inverso da distância; e
- *Cubic*: um método de interpolação por partes baseado em curva de terceira ordem.

2 Metodologia

Esta pesquisa visa comparar os Mapas Globais da Ionosfera do IGS e os mapas regionais do projeto internacional MImOSA na geração de VRS em período de alta e baixa densidade de elétrons. Para tal fim, foi empregado um sistema de posicionamento em redes, que utiliza o conceito de VRS no modo pós-processado, denominado VRS-Unesp (Alves, 2011), bem como as efemérides precisas, os dados do arquivo RINEX da estação base.

Para esta análise foi utilizado os dados da estação PPTE (em Presidente Prudente-SP) da Rede Brasileiro de Monitoramento Contínuo do Sistema GNSS (RBMC) pertencente ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) como estação de referência (base) na geração do RINEX da VRS. A VRS foi gerada na posição da estação SPAR (localizada em Araçatuba-SP), resultando em uma linha de base de 140 km. Esta estação, já possui coordenadas conhecidas homologadas pelo IBGE, conforme a Quadro 3, possibilitando a comparação e validação dos resultados posteriormente.

Coordenada X (m)	3.789.545,4105
Coordenada Y (m)	-4.587.255,7574
Coordenada Z (m)	-2.290.619,3654

Quadro 3 Coordenadas da Estação SPAR em SIRGAS2000.
 Fonte: Descritivo do IBGE

A escolha desta localização está associada a intensificação da densidade de elétrons na região sudeste do Brasil (-22°S em latitude – Figura 2), sendo objeto de estudo dos IONEX fornecidos pelo projeto MImOSA, devido ao efeito da descida do plasma, causado pelo Efeito Fonte.

Os dados das VRSs foram gerados no formato RINEX para 23 dias de estudo, em concordância com a disponibilização dos IONEX do projeto MImOSA que envolvem dias de alta (março e abril) e baixa (junho) densidade elétrons de 2014 e 2015, conforme apresentados na Tabela 1.

Ano	Dias de Estudo
2014	10 a 15 de abril 06 a 10 de junho
2015	1 a 3 de março 17 a 24 de março 29 de março

Tabela 1 Dias de Estudo do projeto MImOSA.

Outro ponto a ser destacado é o fato que em 17 de março de 2015 ocorreu uma forte tempestade geomagnética, conforme o índice geomagnético Dst (Figura 3A) e Kp (Figura 3 B). De acordo com o Quadro 1, esta tempestade é classificada como intensa, pois atinge um valor de 222 nT de índice Dst, do mesmo modo, conforme o Quadro 2, houve uma perturbação máxima neste período com valor máximo de 8 do índice Kp. No entanto, como pode ser visto da Figura 3C, este fato provocou uma inibição na cintilação ionosférica para a estação PRU1 (localizada aproximadamente a 30 m da estação PPTE, pertencente a Rede CIGALA/CALIBRA), após o pôr do sol do dia 17 até dia 19 de março de 2015.

Para cada dia de estudo, foram avaliados três tipos de arquivos do projeto MImOSA, que diferem pelo método de interpolação, *Natural neighbor* (N), *Cubic* (C) e *Lowess* (L), e o modelo IGS. Assim, os dados da VRS foram gerados utilizando as seguintes estratégias para correção ionosférica:

- **VRS_IGS**: correção ionosférica através do IONEX global do IGS, já que é a combinação dos demais centros de análises.
- **VRS_C**: correção ionosférica através do IONEX do projeto MImOSA, *Cubic*;
- **VRS_L**: correção ionosférica através do IONEX do projeto MImOSA, *Lowess*;
- **VRS_N**: correção ionosférica através do IONEX do projeto MImOSA, *Natural neighbor*;

Posteriormente, os dados das VRSs foram processados no serviço gratuito de pós-processamento *Canadian Spatial Reference System* (CSRS-PPP)

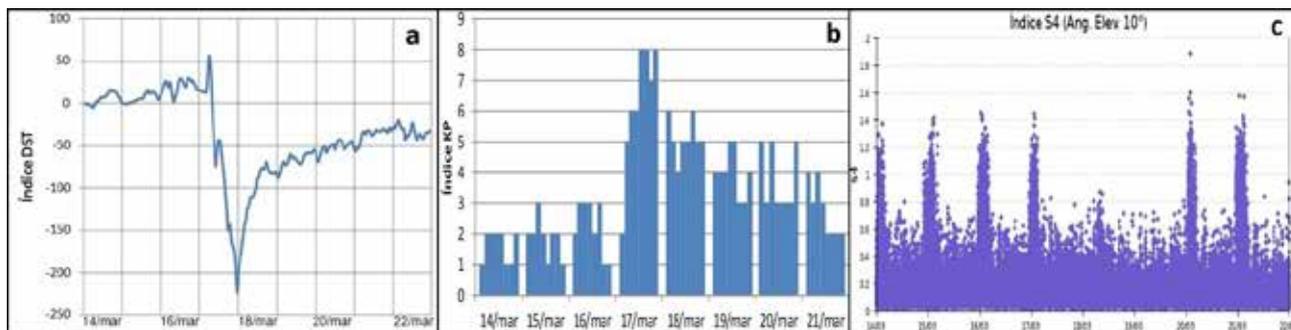


Figura 3 Índices Geomagnéticos: Dst (A) e Kp (B); e Índice de Cintilação Ionosférica S4 (C).
Fonte: Dados do EMBRACE/INPE (A) e (B); Ferramenta ISMR Query Tool Projeto CIGALA/CALIBRA (C).

desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada* (NRCAN), no método cinemático a fim de evidenciar os efeitos ionosféricos no posicionamento, bem como o modo estático, para validação e comparação dos resultados obtidos para cada IONEX.

Deste modo, foi possível avaliar a performance dos mapas ionosféricos no posicionamento baseado em redes em um país que sofre diversas influências da ionosfera. Para análise, foi calculado o Erro Médio Quadrático (EMQ) determinado em cada época (por meio do arquivo de pós-processamento.pos) e o EMQ3D médio diário (por meio do arquivo de pós-processamento.sum), utilizando o *software* Gnuplot e o Excel, respectivamente. O cálculo do EMQ pode ser realizado, pois se conhece a coordenada no qual os dados da VRS foram gerados, disponibilizadas no descritivo oficial do IBGE (Quadro 3).

3 Resultados e Discussões

As Figura 4A e 4B apresentam, respectivamente, o valor médio do EMQ 3D no modo estático dos dias de estudo referente a 2014 e 2015 dos métodos VRS_IGS, VRS_C, VRS_L, VRS_N. Vale destacar, como pode ser observado nestes gráficos (Figuras 4A e 4B) não são representadas os valores de algumas correções, pois nestes casos, os arquivos IONEX fornecido pelo projeto MImOSA não foram disponibilizados.

Com base nas Figura 4A e 4B, as estratégias para correção ionosférica VRS_IGS, VRS_C, VRS_L, VRS_N, apresentam um EMQ 3D médio diário de 7,39 cm, 7,03 cm, 7,54 cm e 6,85 cm, respectivamente para o período alta densidade de elétrons (abril/2015 e março/2015), e 5,46 cm, 5,89 cm, 6,286 cm e 5,84 cm, para período de baixa (junho/2014).

Em linhas gerais, com base nos resultados apresentados concernentes aos 23 dias de estudo, pode-se concluir que o mapa do projeto MImOSA que emprega a interpolação *Natural Neighbor* em 8 dias (34,8% da

amostra) foi mais eficiente que os demais mapas, seguido do mapa IGS (34,8% da amostra, porém apresentado 5 dias de pior performance), *Cubic* (15,79% - 3 dias em 19 dias disponíveis) e *Loweas* (14,28% - 3 dias em 21 dias disponíveis). Por outro lado, os mapas que apresentaram pior performance foram *Loweas* (10 casos), IGS (5 casos), *Cubic* (4 casos) e *Natural Neighbor* (3 casos).

Para uma análise mais criteriosa e detalhada dos dias de alta densidade de elétrons (abril/2014 e março/2015), a Figura 5 apresenta os EMQ3D época por época das estratégias de correção ionosférica VRS_IGS, VRS_C, VRS_L, VRS_N, onde estão representadas em vermelho, verde, azul e roxo, respectivamente.

Ao observar a Figura 5, nota-se que os arquivos IONEX fornecidos pelo projeto MImOSA, no modo Estático, apresentam consideráveis melhorias em relação aos mapas globais do IGS quanto a convergência mais rápida, a estabilização e ao erro posicional, principalmente para os dias de abril/2014 (pico da atividade solar do ciclo 14) e na tempestade geomagnética de 18 e 19 de março de 2015.

Em suma, considerando os 23 dias de estudo, pode-se concluir que em 14 casos (60,9%) os resultados com os IONEX do projeto MImOSA foram melhores que do IGS. No entanto, nota-se que os resultados não são tão discrepantes, em torno de 1 a 2 cm, de diferença entre os métodos na maioria dos casos, exceto para dia o 14 de abril, que atingiu o máximo de 6,8 cm.

Deste modo, foi aplicado a mesma análise para o método Cinemático, a fim de evidenciar a influência do erro ionosférico. A Figura 6 apresenta o valor médio do EMQ 3D do método cinemático dos dias de estudo referente a 2014 (Figura 6A) e 2015 (Figura 6B) dos métodos VRS_IGS, VRS_C, VRS_L, VRS_N.

Com base nas Figura 6A e 6B, as estratégias VRS_IGS, VRS_C, VRS_L, VRS_N, apresentam, respectivamente, um EMQ 3D médio diário de 29,44 cm, 27,39 cm, 29,14 cm e 27,96 cm para o período alta

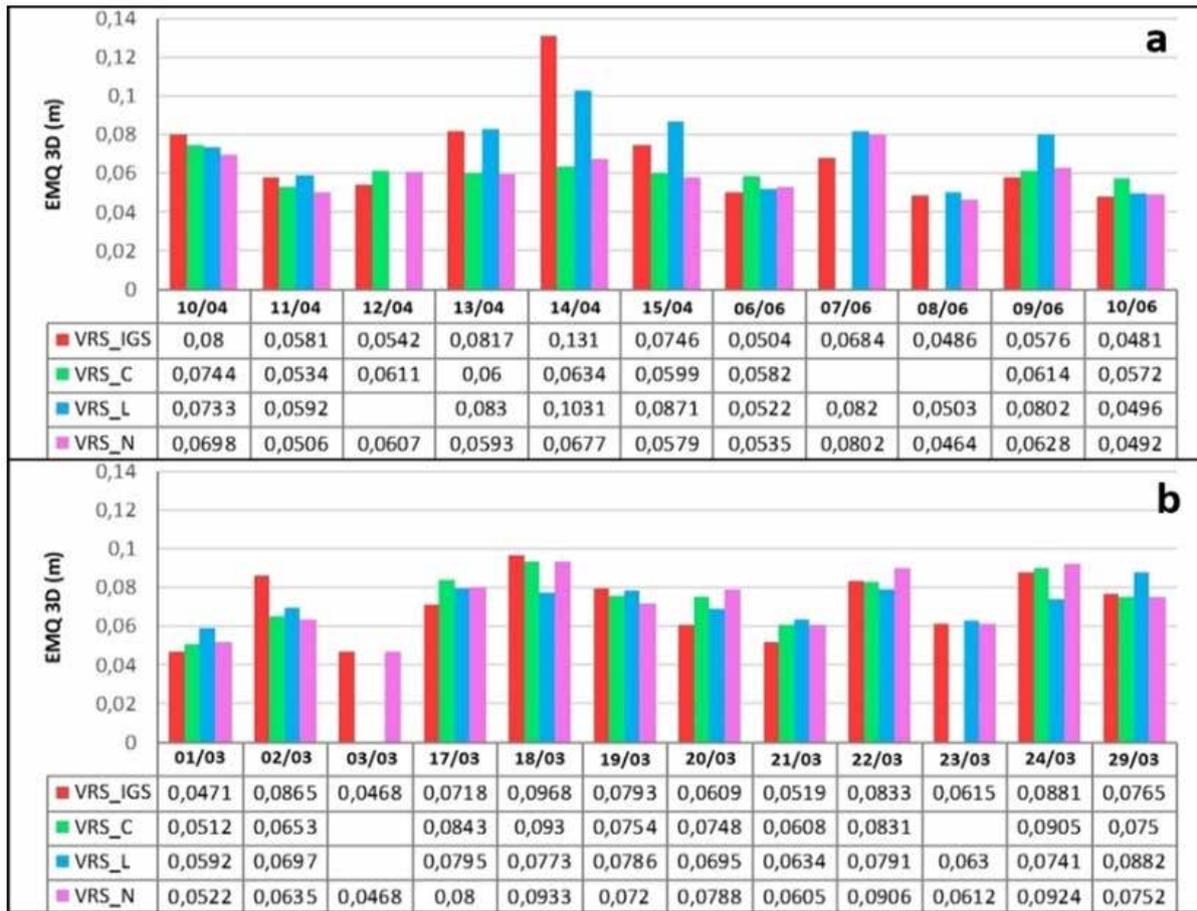


Figura 4 EMQ 3D do PPP Estático das Estratégias de Estudo em 2014 (A) e em 2015 (B).

densidade de elétrons (abril/2015 e março/2015) e 26,22 cm, 29,58 cm, 16 cm e 28,87 cm, para período de baixa (junho/2014). Em linhas gerais, com base nos resultados apresentados concernentes aos 23 dias de estudo, pode-se concluir que o arquivo do projeto MImOSA que emprega a interpolação *Lowees* em 9 dias (39,14% da amostra) foi mais eficiente que os demais mapas, seguido de IGS (26,08%), *Cubic* (21,05% - 4 casos em 19 dias disponíveis) e *Natural Neighbor* (19,05% - 3 casos em 21 dias disponíveis). Por outro lado, os mapas que apresentaram pior performance foram IGS (9 casos), *Natural Neighbor* (6 casos), *Lowees* (4 casos) e *Cubic* (4 casos).

A fim de relacionar o erro obtido no posicionamento, com os horários da variabilidade diurna do TEC, a Figura 7 apresenta os valores do EMQ3D época por época. No entanto, para uma melhor visibilidade dos dados, foi fixada a escala vertical dos gráficos e atribuído um valor máximo de 4 m.

De acordo com a Figura 6 e 7, é possível afirmar que 73,91% (17 dias) dos resultados apontam que os mapas ionosféricos que utilizam dados regionais, bem

como maior resolução espacial e temporal, possibilitam maior detalhamento quanto à ionosfera, como são os fornecidos pelo projeto MImOSA, possibilitando uma melhor modelagem da ionosfera. Tal fato pode ser ainda mais evidenciado no dia 10 de abril de 2014 (Figura 6A) onde as estratégias VRS_C, VRS_L, e VRS_N apresentam uma melhora de aproximadamente 46,43% em relação ao IGS.

Outro ponto importante a ser destacado, com base na Figura 7, que nos períodos de maior densidade de elétrons (17 – 21 UTC, ou seja 14 – 18 HL) o arquivo IONEX do IGS (representado em vermelho no gráfico) não modela adequadamente o efeito de cintilação ionosférica e variabilidade diurna do TEC, como pode ser notado nos dias 01 e 02 de março de 2015, 10 e 11 de abril, 06 e 09 de junho de 2014, apresentando um erro superior à 50 cm, enquanto os modelos do MImOSA neste mesmo período obtêm os melhores resultados, inferior à 30 cm.

Além disso, no dia 29 de março (nos períodos de cintilação ionosféricas – 0 à 5 UTC), as estratégias de correção ionosférica VRS_C, VRS_L, e VRS_N,

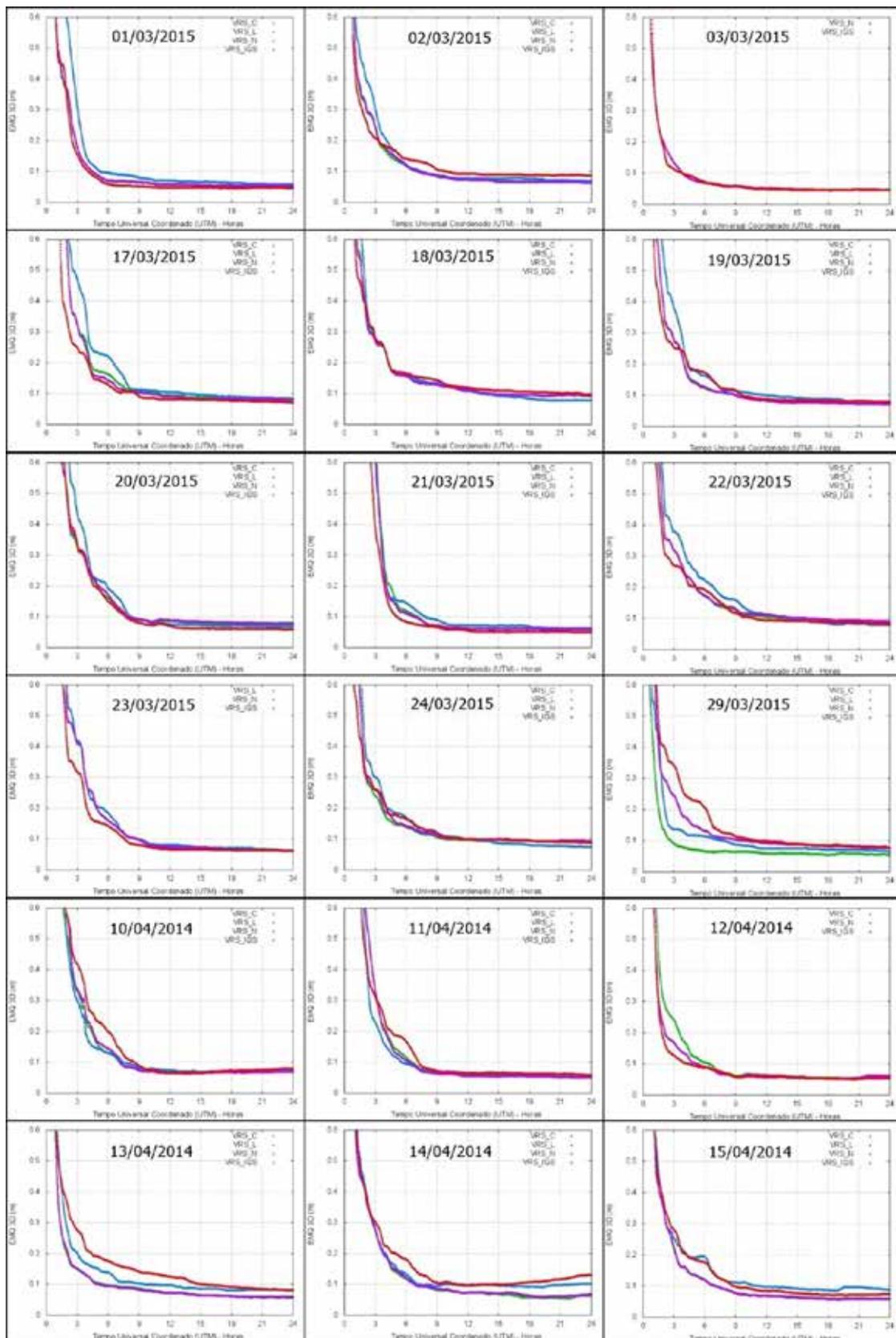


Figura 5 EMQ 3D do PPP Estático por época em 2014 e em 2015.



Figura 6 EMQ 3D do PPP Cinemático das Estratégias de Estudo em 2014 (A) e em 2015 (B).

apresentaram melhor desempenho no posicionamento. No entanto, em dias que apresentam alta densidade de elétrons 20 e 21 de março de 2015 (após tempestade geomagnética), nenhum mapa modela adequadamente a ionosfera.

Por outro lado, como pode ser observado, há uma alta correlação entre os índices geomagnéticos (Dst – Figura 3A e Kp - Figura 3B) e o resultado do EMQ 3D (Figura 7) época por época durante e após a tempestade geomagnética. A fase principal da tempestade, que é caracterizada pela brusca queda do valor da intensidade do índice, foi iniciada no dia 17 de março de 2015 as 8 horas (UTC), e atinge seu mínimo as 23 horas (Figura 3A). Nota-se que desde a fase inicial à fase de recuperação, que encerra as 20 horas do dia 18 de março, o EMQ 3D apresenta os valores máximos, atingindo 5,4 metros.

4 Conclusão

Destaca-se a importância de estudos que contribuem para análise do efeito ionosférico no posicionamento, principalmente quando é necessário realizar posicionamento

acurado. Além disso, a maior parte do território brasileiro está localizado na região do equador geomagnético, sendo esta a mais crítica para o posicionamento devido à ionosfera, o que torna pesquisas nesta área ainda mais relevantes.

Deste modo, neste artigo, analisou o desempenho do Mapa Global da Ionosfera, fornecido pelo IGS, e os Mapas Regionais do Projeto MIMOSA na geração da VRS. Verificou, em conformidade com análise dos resultados, que os mapas ionosféricos que utilizam dados regionais, bem como, maior resolução espacial e temporal, possibilitam maior detalhamento da ionosfera, como são os arquivos fornecidos pelo projeto MIMOSA, consequentemente, proporcionam uma melhor modelagem da ionosfera.

No entanto, embora o Modelo do IGS seja um modelo global e no Brasil sua rede é pouco densificada, a estratégia apresentou boa performance, e em alguns dias, principalmente nos dias concernentes a tempestade solar foi relativamente melhor que o modelo regional, no método cinemático. No entanto, em dias que apresentam alta densidade de elétrons 20 e 21 de março

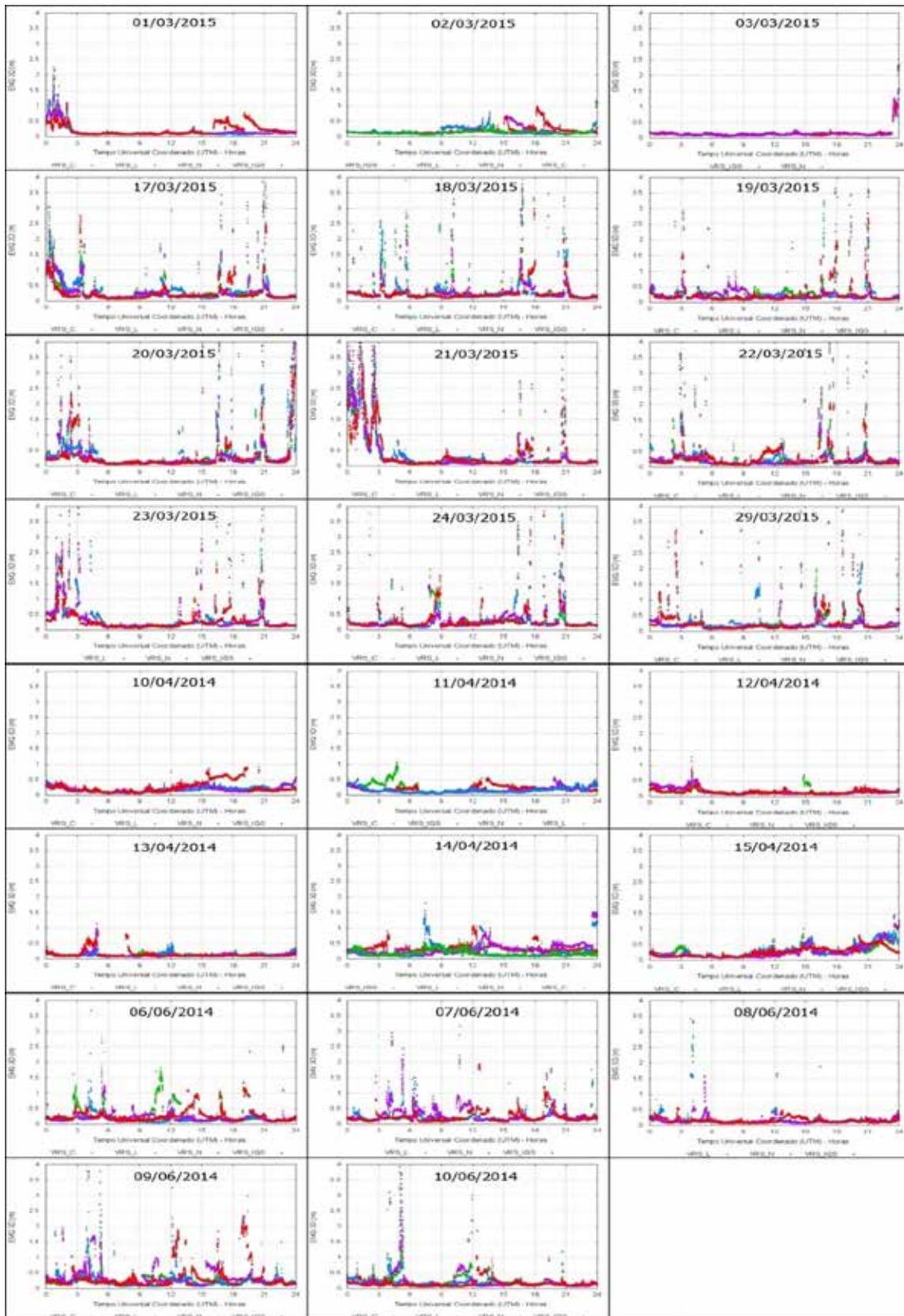


Figura 7 EMQ 3D época por época no método Cinemático para os dias de 2015 e 2014.

de 2015 (após tempestade geomagnética), nenhum mapa modela adequadamente a ionosfera.

De uma forma geral, esta pesquisa contribuiu com o desenvolvimento científico nacional, visto que a modelagem ionosférica é de extrema importância para realizar posicionamento acurado no Brasil, por estar localizado em região equatorial e de baixa latitude. Além disso, o posicionamento em rede pode ser utilizado em inúmeras aplicações, ainda mais com a evolução da densificação da RBMC, nos últimos anos.

5 Agradecimentos

Aos projetos MImOSA pela disponibilização dos dados IONEX. À FAPESP pelo financiamento da bolsa da primeira autora (2014/03858-9), pelo projeto Regular da terceira autora (processo 2012/19906-7) e projeto Universal CNPq (Processo 483954/2011-0) do quarto autor.

6 Referências

- Aguiar, C.R. 2010. *Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS*. Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP, Tese de Doutorado, 254p.
- Alfonsi, L.; Cesaroni, C.; Romero, R.; Linty, N.; DAVIS, F.; Veentil, S.V.; Park, J.; Alves, D.B.M.; Ortega, M.C. 2015. Monitoring Ionosphere over South America: the MImOSA and MImOSA2 projects. In INTERNATIONAL ASSOCIATION OF INSTITUTES OF NAVIGATION WORLD CONGRESS, Praga, p. 20–23.
- Alves, D.B.M. 2011. *Desenvolvimento e Implantação do RTK em Rede para Posicionamento Geodésico no Estado de São Paulo*, Pós-Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP.
- Alves, D.B.M. 2008. *Posicionamento Baseado em redes GPS utilizando o conceito de estação virtual*. Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP, Tese de Doutorado, 161p.
- Alves, P.; Ahn, Y.; Lachapelle, G. 2003. The Effects of Network Geometry on Network RTK Using Simulated GPS Data. In: ION GPS/GNSS 2003, Portland, Session F3.
- Aquino, M.; Monico, J.F.G.; Dodson, A.; Marques, H.A. 2006. Mitigating the effects of ionospheric scintillations on position estimates. In: INVITED PRESENTATION TO THE 3RD EUROPEAN SPACE WEATHER WEEK, Brussels, p.13–17.
- Camargo, P.O. 1999. *Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Tese de Doutorado, 191p.
- Conker, R.S.; El-Arini, M.B.; Hegarty, C.J.; Hsiao, T. 2003. Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability. *Radio Science*, 38(1):1-23.
- Davies, K. 1990. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 580p.
- De Paula, E.R.; Kantor, I.J.; Rezende, L.F.C.; Muella, M.T.H.; Campos, A.A.N.; Smorigo, P.F.; Neto, A.C. 2008. Characteristics of the low latitude ionospheric irregularities and their effects over GPS signal. In: IONOSPHERIC SCINTILLATION: SCIENTIFIC ASPECTS SPACE WEATHER AND SERVICES WORKSHOP, Nottingham.
- Euler, H.J.; Keenan, R.; Zebhauser, B. 2001. Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. In: ION GPS 2001, Salt Lake City, Utah.
- Fedrizzi, M. 1999. *Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS*. Programa de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Dissertação de Mestrado, 142p.
- Fedrizzi, M. 2003. *Estudo do efeito de tempestades magnéticas na ionosfera utilizando dados do GPS*. 2003. Pós Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Tese de Doutorado, 256p.
- Fotopoulos, G. 2000. *Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations*. Pós Graduação em Ciências, University of Calgary, Calgary, Dissertação de Mestrado, 202p.
- Hu, G.R. 2003. Development and Assessment of GPS Virtual Reference Stations for RTK Positioning. *Journal of Geodesy*, 77: 292-302.
- IGS. International GNSS Service – Product. Disponível em: <<http://www.igs.org/products>>. Acesso em: 14 set. 2019.
- Langley, R.B. 2011. What’s in Store for the Next Solar Maximum? GPS World – Innovation: GNSS and the Ionosphere. Disponível em <<https://www.gpsworld.com/innovation-gnss-and-ionosphere-11036/>>. Acesso em: 20 Jan. 2020.
- Matsuoka, M.T. 2007. *Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na Região Brasileira*. 2007. Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP, Tese de Doutorado, 263p.
- Matsuoka, M.T.; Camargo, P.O. 2002. Correção ionosférica utilizando o modelo de Klobuchar e o regional da ionosfera: avaliação da performance no posicionamento por ponto. *Série em Ciências Geodésicas*, 2: 20–40.
- McNamara, L.F. 1991. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Flórida: Krieger Publishing Company, 237p.
- Mendonça, M.A.M. 2013. *Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS*. Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP, Dissertação de Mestrado, 148p.
- MImOSA. Monitoring Ionosphere Over South America. Disponível em: <<http://roma2.rm.ingv.it/en/projects/international/744/MImOSA2>>. Acesso em: 17 jun. 2019.
- Marques, H.A.; Monico, J.F.G.; Marques, H.A.S; Aquino, M. 2014. Análise dos efeitos ionosféricos de ordem superior no ciclo solar 24 e influência no posicionamento GNSS absoluto. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 4: 879-901.
- Monico, J.F.G. 2008. *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 476p.

- Oliveira, A.B.V. 2003. *Uso do GPS para o estudo da Anomalia Equatorial*. Programa de Pós Graduação de Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, Dissertação de Mestrado, 167p.
- Oliveira, A.M; Paula, E.R.; Perrella, W.J.; Rodrigues, F.S. 2012. On the distribution of GPS signal amplitudes during low-latitude ionospheric scintillation. *GPS Solutions* 10:1-12.
- Ram, S.T.; Su, S.-Y.; Liu, C.H. 2009. FORMOSAT-3/COSMIC observations of seasonal and longitudinal variations of equatorial ionization anomaly and its interhemispheric asymmetry during the solar minimum period. *Journal of Geophysical Research*, 114 (A06311):1-15.
- Rodrigues, F.S.R. 2003. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. Pós Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Dissertação de Mestrado, 151p.
- Seeber, G. 2003. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 546p.
- Vani, B. 2013. *Análise da Cintilação Ionosférica no Brasil empregando GNSS e Técnicas de Visualização de Dados*. Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP, Dissertação de Mestrado, 139p.