PROCEDIMENTO GERAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE RISCO IONOSFÉRICO PARA GBAS E PRINCIPAIS MODELOS EXISTENTES

VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA[1]
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO[1,2]
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO[1,2]

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT, Presidente Prudente – SP
[1] Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
[2] Departamento de Cartografia
vi_stuani@hotmail.com; {galera, paulo}@fct.unesp.br

RESUMO – O desenvolvimento de um modelo risco ionosférico para GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) no Brasil é uma necessidade e uma realidade, haja vista que o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) adquiriu em 2011 uma estação GBAS modelo SLS-4000 da Honeywell, a qual foi instalada no Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão) no Rio de Janeiro/RJ para testes. Uma vez que o equipamento está certificado para operação somente nos Estados Unidos, Alemanha e parte da Austrália é necessária a estimativa dos parâmetros do modelo para a região de interesse. Neste sentido, são apresentados no trabalho os principais conceitos envolvidos no desenvolvimento de um modelo de risco ionosférico, bem como as características dos modelos já existentes, informações estas importantes para a realidade brasileira.

Palavras chave: Modelo de Risco Ionosférico, GBAS, Gradiente Ionosférico, Ionosfera.

ABSTRACT – The development of an ionospheric threat model for GBAS (Ground-Based Augmentation System) in Brazil is a necessity and a reality, since DECEA (Department of Airspace Control) acquired in 2011 a Honeywell's GBAS station model SLS-4000, which was installed at the Tom Jobim International Airport (Galeão) in Rio de Janeiro/RJ for tests. Since the equipment is certified for operation only in the United States, Germany and part of Australia, it is necessary to estimate the model parameters for the region of interest. In this sense, the main concepts involved in the development of an ionospheric threat model are presented in this paper, as well as the characteristics of the existing models, information important for the Brazilian reality.

Key words: Ionospheric Threat Model, GBAS, Ionospheric Gradient, Ionosphere.

1 INTRODUÇÃO

Um dos princípios básicos de funcionamento do GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) é que as estações de referência em solo e o receptor da aeronave rastreiem simultaneamente os mesmos satélites, cujos sinais são submetidos a atrasos devido à camada ionosférica. No entanto, os atrasos não são iguais devido às linhas de visada ser diferentes para as estações e para a aeronave. Neste cenário é que se desenvolve e se aplica um modelo de risco ionosférico.

Um modelo conceitual de risco ionosférico determina a máxima decorrelação espacial existente entre o atraso proporcionado por um satélite a uma estação de referência e o atraso que este mesmo satélite acomete em uma aeronave. O modelo de risco também determina parâmetros de integridade, de modo a permitir a estimativa da qualidade do posicionamento da aeronave durante as fases de aproximação e pouso (DATTA-BARUA et al., 2010). A análise final é então obtida a partir da razão da diferença entre os atrasos devido à ionosfera e uma distância de separação entre as linhas de visada, razão esta denominada de gradiente ionosférico (DATTA-BARUA et al., 2002 e 2010).

Destaca-se que o modelo de risco ionosférico é único e exclusivo para a região dos dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) utilizados em seu desenvolvimento. Assim, para cada estação GBAS instalada em um determinado aeroporto, é necessário que se desenvolva e analise o seu próprio modelo de risco.

No Brasil, o órgão responsável pelo controle das atividades relacionadas ao espaço aéreo é o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo). Em 2011 o

departamento adquiriu uma estação GBAS modelo SLS-4000 da empresa norte-americana Honeywell, a qual foi instalada no Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão) no Rio de Janeiro/RJ, com o intuito de avaliar a qualidade do serviço no âmbito brasileiro. Entretanto, ressalva-se que o equipamento está certificado para operação somente nos Estados Unidos, Alemanha e parte da Austrália.

Assim, o desenvolvimento de um modelo de risco ionosférico brasileiro para GBAS torna-se uma necessidade e uma realidade, sobretudo no que diz respeito à modelagem e mitigação dos efeitos ionosféricos característicos da região.

Neste sentido é realizada uma revisão geral de conceitos relacionados a um modelo de risco ionosférico, com destaque para os parâmetros de um modelo, métodos para a determinação do gradiente ionosférico, procedimento geral para o desenvolvimento de um modelo e as características dos principais modelos já existentes, sob justificativa de disponibilizar informações importantes para a realidade brasileira, uma vez que trabalhos iniciais já estão sendo realizados e resultados preliminares sendo obtidos.

2 PARÂMETROS DE UM MODELO DE RISCO

Em um modelo de risco a Anomalia de Ionização Equatorial (AIE) e as irregularidades ionosféricas são modeladas como uma "frente ionosférica", que se desloca com uma determinada velocidade horizontal, de modo a produzir gradientes de erro ionosférico (MAYER et al., 2009). A representação de uma frente ionosférica é apresentada na Figura 1, sendo os parâmetros de um modelo de risco dado por: gradiente ionosférico (g), velocidade (V_{iono}) e extensão da frente ionosférica (W_{iono}) e valor máximo de atraso ionosférico ou de TEC (*Total Electron Content*).

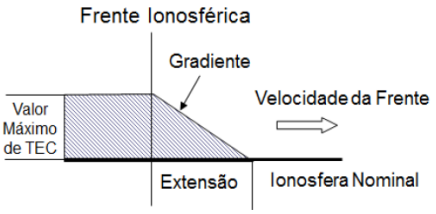

Figura 1 – Representação de uma frente ionosférica. Fonte: Adaptado de Mayer et al. (2009).

Os limites destes parâmetros são determinados por meio do processamento de um conjunto de dados que contemplam dias em que há fortes perturbações na densidade de elétrons. Ressalva-se, entretanto, que não há variação temporal e sazonal para os valores obtidos.

A metodologia para a determinação dos parâmetros de um modelo de risco pode ser encontrada em Srinivas et al. (2014) e Mayer et al. (2009).

Para a determinação da velocidade de uma frente ionosférica divide-se a distância linear entre duas estações pela diferença de tempo em que ocorre o atraso ionosférico máximo nestas duas estações para um determinado satélite. A equação (1) apresenta o cálculo (DATTA-BARUA et al., 2010):

$$V_{iono} = \frac{D_{r1r2}}{\left| t^{s}_{r1\,máx} - t^{s}_{r2\,máx} \right|} \tag{1}$$

onde: D_{r1r2} – distância linear entre as estações 1 e 2; $t^{s}_{r1\,máx}$ e $t^{s}_{r2\,máx}$ – instantes em que ocorrem os atrasos ionosféricos máximos nas estações 1 e 2 referente ao satélite s.

A extensão da frente ionosférica, por sua vez, é dada pela equação (2) (DATTA-BARUA et al., 2010):

$$W_{iono} = \left(V_{iono} - V_{IPP}\right) \cdot \left| t^{s}_{r\,máx} - t^{s}_{r\,min} \right| \tag{2}$$

onde: V_{IPP} – velocidade do IPP (*Ionospheric Pierce Point*); $t^{s}_{r\,máx}$ e $t^{s}_{r\,min}$ – instantes em que ocorrem os atrasos ionosféricos máximo e mínimo na estação r referente ao satélite s.

Repara-se que há a necessidade de determinar a velocidade do IPP para o cálculo da extensão, pois os deslocamentos do satélite e da frente ionosférica podem não ocorrer no mesmo sentido. A equação (3) mostra como determinar o V_{IPP} (DATTA-BARUA et al., 2010):

$$V_{IPP} = \frac{D_{IPP}}{t_{IPP}} \tag{3}$$

sendo: D_{IPP} – distância entre os IPP referente aos instantes t_1 e t_2 para um mesmo satélite; e t_{IPP} – diferença de tempo entre os instantes t_1 e t_2.

Já o valor máximo de atraso ionosférico que pode haver em um modelo de risco pode ser obtido a partir da multiplicação da extensão máxima da frente ionosférica pelo gradiente ionosférico máximo obtido, ou estimando os atrasos a partir de valores de TEC.

3 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE IONOSFÉRICO

Gradientes ionosféricos podem ser determinados a partir de dois métodos: *station-pair method* e o *time-step method* (LEE et al., 2007).

3.1 *Station-pair method*

O *station-pair method* trata cada par de estações de uma rede de monitoramento contínuo como uma estação GBAS e um receptor de uma aeronave (LEE et al., 2007). Os pares são configurados de forma que as estações de um par rastreiem o mesmo satélite concomitantemente, conforme representa a Figura 2.

Para um determinado instante, a estimativa do gradiente ionosférico inclinado para um dado satélite (g^s) se dá pela razão entre o módulo da diferença dos atrasos ionosféricos inclinados das duas estações pela distância de separação entre as estações (SRINIVAS et al., 2014):

$$g^{s} = \frac{\left| I^{s}_{r1} - I^{s}_{r2} \right|}{D_{r1r2}} \tag{4}$$

onde: I^{s}_{r1} e I^{s}_{r2} – atrasos ionosféricos inclinados referentes às estações 1 e 2 e ao satélite s.

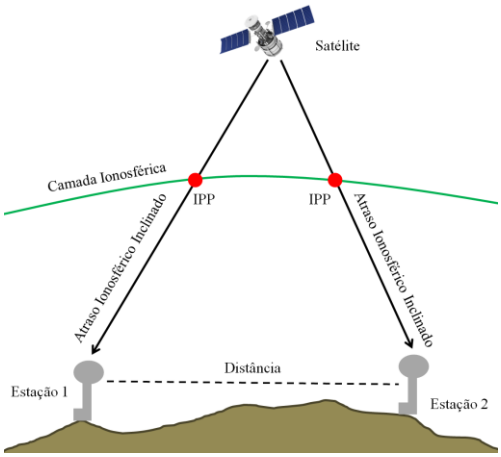

Figura 2 – Determinação do gradiente ionosférico pelo *station-pair method*. Fonte: Adaptado de Lee et al. (2007).

O gradiente ionosférico é normalmente expressado em mm/km, embora o LAAS (*Local Area Augmentation System*) utilize como unidade o m/m. Uma variante que pode ocorrer é a não utilização do módulo na diferenciação dos atrasos, proporcionando dessa maneira gradientes negativos. Outra possibilidade de estimar os gradientes inclinados consiste em, ao invés de dividir o termo $\left|I^s_{r1} - I^s_{r2}\right|$ pela distância entre as estações terrestres (D_{r1r2}), dividir pela distância entre os IPP referente ao par de estações ($D_{IPPr1r2}$), acarretando em algumas situações distâncias inferiores que a separação física das estações (LEE et al., 2007).

Devido à pequena magnitude dos gradientes ionosféricos nominais (gradientes obtidos quando o comportamento da ionosfera não está perturbado), tem-se que os valores dos mesmos podem ser facilmente influenciados por ruídos, erros ou tendências (LEE et al., 2007). Uma tendência típica é o DCB (*Differential Code Bias*), resultante de atrasos entre duas portadoras nos *hardwares* do receptor e do satélite. Como as duas estações estão rastreando o mesmo satélite, o erro devido ao DCB do satélite é eliminado, ao contrário do DCB dos receptores, que necessitam ser estimados.

Para a determinação de gradientes ionosféricos para linhas de base curtas é necessário que a rede de estações seja densa o suficiente para proporcionar separações de estações em torno de 40 a 100 km, e de preferência com pares orientados paralelamente ao equador magnético.

3.2 *Time-step method*

O método do passo do tempo foi desenvolvido com o intuito de aumentar a amostragem de gradientes ionosféricos, bem como, obter gradientes com distâncias menores do que a separação física das estações da rede (DATTA-BARUA et al., 2002).

O método agrupa um único satélite e uma única estação como um par, conforme mostra a Figura 3.

O atraso ionosférico entre o satélite e o receptor da estação em um instante t_1 é comparado com o atraso do mesmo par em um instante posterior t_2. O gradiente é então calculado pela divisão entre o valor absoluto da diferença dos atrasos dos instantes t_1 e t_2 pela distância entre os IPP referentes aos instantes t_1 e t_2:

$$g^s = \frac{\left|I^s_{r\,t_1} - I^s_{r\,t_2}\right|}{D_{IPP\,t1t2}} \tag{5}$$

onde: $I^s_{r\,t_1}$ e $I^s_{r\,t_2}$ – atrasos para os instantes t_1 e t_2.

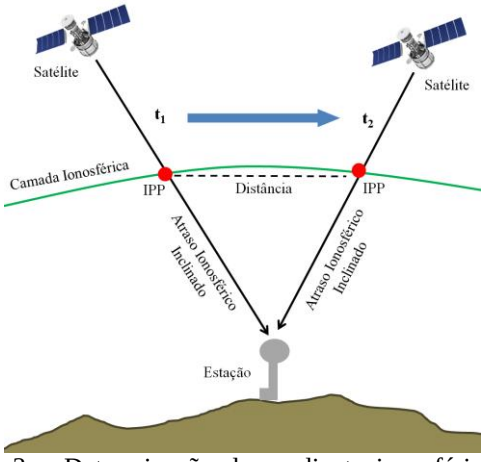

Figura 3 – Determinação do gradiente ionosférico pelo *time-step method*. Fonte: Adaptado de Lee et al. (2007).

A partir desta configuração de satélite-estação podem-se obter gradientes ionosféricos com distâncias menores que 40 km apenas controlando o intervalo de tempo ($\Delta t = t_2 - t_1$). Gradientes provenientes de distâncias menores que 40 km são considerados ideais para aplicações GBAS (LEE et al., 2007).

Um aspecto negativo do método é que tem pouca semelhança, em termos de arquitetura, com a configuração de uma estação GBAS e uma aeronave que se aproxima, sendo assim não muito intuitivo para os usuários relacionar o *time-step method* com as aplicações GBAS (LEE et al., 2007).

Quando faz a diferença entre os atrasos provenientes de um mesmo satélite e de uma mesma estação, ambos os erros devido ao DCB do satélite e do receptor são eliminados. No entanto, o método acaba introduzindo outra fonte de erro: a decorrelação temporal (LEE et al., 2007).

4 PROCEDIMENTO GERAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO

O desenvolvimento de um modelo de risco pode ser decomposto em vários processos automáticos e manuais. Datta-Barua et al. (2010) e Kim et al. (2015), para elaborarem os respectivos modelos de risco norte-americano (*CONUS Threat Model*) e sul-coreano (*Korean Threat Model*), arquitetaram um procedimento geral para a obtenção dos parâmetros do modelo, apresentado em forma de fluxograma na Figura 4.

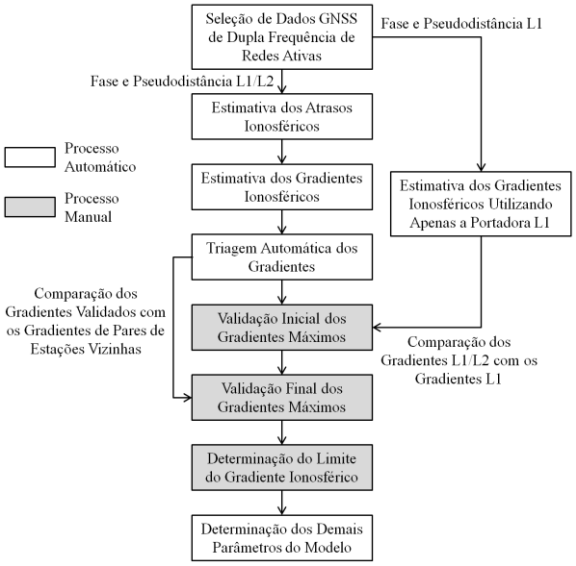

Figura 4 – Procedimento geral para o desenvolvimento de um modelo de risco ionosférico. Fonte: Adaptado de Datta-Barua et al. (2010) e Kim et al. (2015).

4.1 Seleção de dados GNSS de dupla frequência de redes ativas

Dados GNSS de dupla frequência são necessários para a estimativa dos atrasos ionosféricos. Para que os parâmetros retratem corretamente as condições ionosféricas de uma determinada região, implica-se que as separações das estações selecionadas sejam pequenas, próximas a dezenas de quilômetros, e que a disposição das estações seja de tal forma que cubra toda a região.

Além da escolha das estações das redes ativas, devem-se selecionar dias em que o comportamento da ionosfera seja anômalo, de preferência durante os ciclos solares 23 e 24, para que o pior cenário em termos de erros ionosféricos seja representado pelo modelo.

Para a seleção de dias anômalos pode-se utilizar os índices geomagnéticos K_p e D_{st}, devido a alta correlação da atividade geomagnética com a atividade ionosférica. Jung e Lee (2012) estabelecem os seguintes critérios de seleção de dias: valor máximo diário de K_p próximo de 6,0 e valor diário mínimo de D_{st} próximo de -200 nT. Estes critérios são utilizados para discriminar, de forma conservadora, todos os potenciais períodos de tempestade ionosférica (JUNG; LEE, 2012).

Apesar de serem efetivos, os índices geomagnéticos não conseguem identificar todas as sutis perturbações na ionosfera tropical. Assim, especialistas do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e do Boston College sugerem o uso do índice de cintilação de amplitude S4 para identificar as atividades ionosféricas após o pôr do Sol na região tropical. Um critério adotado é selecionar dias em que o valor máximo do S4 é próximo de 1,0, o que representa forte cintilação ionosférica.

4.2 Estimativa dos atrasos ionosféricos

Os atrasos ionosféricos podem ser estimados a partir do uso dos sinais GNSS de receptores de dupla frequência, os quais estão submetidos aos efeitos dispersivos da camada ionosférica. Reescrevendo os modelos funcionais da pseudodistância e da fase para as portadoras L1 e L2 do GPS (*Global Positioning System*) obtêm-se (KIM et al., 2015):

$$PD^s_{rL1} = r^s_r + I^s_r + \nu_{PD_{L1}} \quad (6)$$

$$PD^s_{rL2} = r^s_r + \gamma I^s_r + c\left(DCB_r + DCB^s\right) + \nu_{PD_{L2}} \quad (7)$$

$$\Phi^s_{rL1} = r^s_r - I^s_r + N^s_{rL1} + \nu_{\Phi_{L1}} \quad (8)$$

$$\Phi^s_{rL2} = r^s_r - \gamma I^s_r - c\left(DCB_r + DCB^s\right) + N^s_{rL2} + \nu_{\Phi_{L2}} \quad (9)$$

onde: r^s_r – soma da distância geométrica entre o satélite e o receptor, dos erros dos relógios do receptor e do satélite, dos erros devido à troposfera, ao multicaminho e a posição do satélite; γ – fator de proporcionalidade para a conversão do atraso ionosférico na portadora L2 para a portadora L1, dado por f^2_{L1}/f^2_{L2}; c – velocidade da luz no vácuo; DCB_r – tendência diferencial no receptor; DCB^s – tendência diferencial no satélite; N^s_{rL1} e N^s_{rL2} – ambiguidades do satélite para as portadora L1 e L2.

Dessa forma, o atraso ionosférico inclinado na portadora L1 (I^s_r) pode ser estimado utilizando tanto as medidas de pseudodistância quanto as medidas de fase nas portadoras L1 e L2. As estimativas do atraso a partir da pseudodistância são mais ruidosas do que as derivadas de medidas de fase, pois a observável fase apresenta erros de multicaminho e ruídos termais menores que a pseudodistância, ou seja, $\nu_\Phi << \nu_{PD}$ (KIM et al., 2015). Portanto, I^s_r é dado por:

$$I^s_r = \frac{\Phi^s_{rL1} - \Phi^s_{rL2}}{\gamma - 1} - \frac{c}{\gamma - 1}\left(DCB_r + DCB^s\right) - \frac{N^s_{rL1} - N^s_{rL2}}{\gamma - 1} \quad (10)$$

No desenvolvimento do *CONUS Threat Model*, as medidas de atraso ionosférico foram estimadas pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) a partir do algoritmo de processamento *Supertruth*, descrito por Komjathy et al. (2004). No *Supertruth* os dados GNSS de dupla frequência são processados utilizando o *software* GIM (*Global Ionospheric Mapping*) e o módulo *SanEdit* do GIPSY-OASIS com o intuito de detectar perdas de ciclos e estimar os DCB do satélite e do receptor. Os atrasos ionosféricos provenientes do *Supertruth* são de alta precisão, entretanto, a abordagem pós-processada do algoritmo demanda muito tempo de execução, não sendo propício o seu uso em aplicações de tempo quase real (KIM et al., 2015). Neste sentido, Jung e Lee (2012) desenvolveram o algoritmo *Simple Truth*, mais simples e rápido. Um dos principais diferenciais trata-se da estimativa e remoção dos DCB do satélite e do receptor, sendo as tendências dos satélites obtidas pelos valores disponibilizados pelos diversos serviços internacionais GNSS, como o IGS (*International GNSS Service*) e o CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), e a tendência do receptor determinada a partir do método proposto por Ma e Maruyama (2003).

4.3 Estimativa dos gradientes ionosféricos

Os gradientes ionosféricos são estimados a partir do *station-pair method* e/ou pelo *time-step method*. Os principais modelos de risco utilizam o primeiro método.

Uma forma de visualizar e analisar os gradientes ionosféricos estimados para um par é por meio da comparação simultânea entre o gráfico dos atrasos ionosféricos inclinados das estações do par, o gráfico das elevações do satélite em cada estação e o próprio gráfico do gradiente ionosférico. Neste sentido, a Figura 5 mostra exemplo de resultados obtidos do par YOSU-HADG (distância de 44,95 km) para o satélite GPS 31 durante o período entre 12h e 14h30 TU (Tempo Universal) do dia 10 de novembro de 2004.

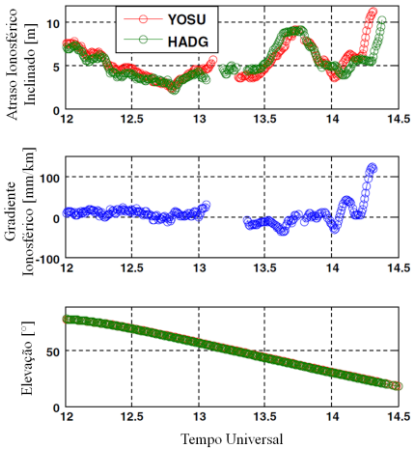

Figura 5 – Exemplo de resultados de atraso ionosférico, gradiente ionosférico e elevação para um satélite GPS de um par de estações do *Korean Threat Model*. Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

Verifica-se pela Figura 5 que à medida que a elevação do satélite diminui, ocorre um aumento do atraso ionosférico, bem como uma maior variabilidade do gradiente ionosférico. Pode-se extrair também da Figura 5 que a falta de dados de dupla frequência influenciam na estimativa dos atrasos, que por sua vez provocam uma descontinuidade nos valores dos gradientes.

4.4 Triagem automática dos gradientes

Depois de estimados os gradientes para todos os pares de estações e para todas as épocas, um processo automático separa todos os gradientes que excedem um determinado limiar: 60 mm/km de acordo com Kim et al. (2015) ou 100 mm/km baseado em Datta-Barua et al. (2010). A grande maioria dos gradientes inferior ao limiar não são devidos a eventos ionosféricos, mas sim causados por falhas no receptor ou erros de pós-processamento.

Nos casos em que duas estações são muito próximas (distância de separação menor que 100 m) ou o gradiente inclinado não varia em relação ao tempo são designados de erros interreceptores e são eliminados no processo automático. Outros casos em que as medidas de atraso ionosférico de uma estação não variam no tempo e as medidas da outra estação variam são atribuídas a falhas no receptor, e também são eliminados no processo (DATTA-BARUA et al., 2010).

Os gradientes cuja taxa de variação do atraso ionosférico é superior a 15 mm/s são classificados como, provavelmente, provenientes de efeitos da camada ionosférica. O limiar de 15 mm/s é definido como sendo uma ordem de grandeza menor que a maior taxa de variação determinada para a tempestade ionosférica do dia 29 de outubro de 2003. A vantagem do uso deste limiar é que os reais eventos ionosféricos são menos susceptíveis de serem eliminados como falsos negativos. A desvantagem é que falsos alarmes podem ocorrer quando há perdas de ciclos, fazendo com que o valor do atraso salte repentinamente entre dois instantes. Estes casos têm de ser eliminados manualmente após a triagem automática (DATTA-BARUA et al., 2010).

4.5 Validação dos gradientes

É necessário examinar manualmente todos os gradientes máximos triados, com o objetivo de comprovar que os eventos observados são, de fato, eventos ionosféricos anômalos. Dois tipos de validações são realizados (KIM et al., 2015; DATTA-BARUA et al., 2010): validação inicial, que consiste na comparação dos gradientes provenientes de dados de dupla frequência com os gradientes estimados apenas com a portadora L1, e a validação final, em que compara-se os gradientes de pares de estações vizinhas.

Estimativas utilizando dados de dupla frequência são mais propensas a erros de descontinuidade de rastreamento e perdas de ciclos devido às características inerentes da portadora L2, ao contrário dos gradientes estimados de atrasos utilizando apenas a pseudodistância e a fase na portadora L1 (CMC – *Code Minus Carrier*), dados pela equação (KIM et al., 2015):

$$I^{s}_{r\,CMC} = \frac{PD^{s}_{r\,L1} - \Phi^{s}_{r\,L1}}{2} + \frac{N^{s}_{r\,L1}}{2} \qquad (11)$$

Assim, os gradientes de dupla frequência são comparados com os gradientes CMC para os mesmos pares de estações, satélites e instantes. Se as estimavas de dupla (L1/L2) e simples (L1) frequência apresentam um alto grau de concordância, o gradiente de dupla frequência em análise é declarado validado parcialmente.

Exemplo de comparação dos gradientes de simples e de dupla frequência é apresentado na Figura 6, sendo os gradientes L1/L2 os mesmos apresentados na Figura 5 para o par YOSU-HADG do modelo sul-coreano.

As descontinuidades presentes nas estimativas de dupla frequência não existem nas estimavas usando somente a L1, corroborando o fato que a falta de dados é limitada apenas a portadora L2. Devido os dois tipos de gradientes apresentarem um comportamento similar ao longo do tempo, pode-se concluir que evento em análise é devido a uma anomalia ionosférica.

Quando os valores dos gradientes L1/L2 e L1 forem muito discrepantes, devem considerar os gradientes CMC como os válidos para esta fase de validação inicial,

devido às estimativas CMC serem mais confiáveis (KIM et al., 2015; DATTA-BARUA et al., 2010).

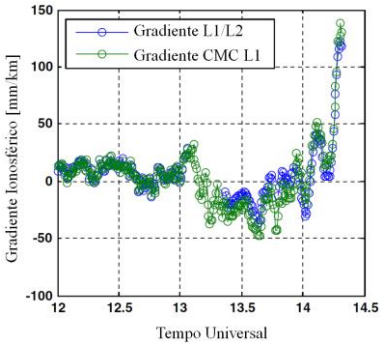

Figura 6 – Exemplo de resultados de gradiente de dupla frequência e de gradiente CMC para um satélite GPS de um par de estações do *Korean Threat Model*. Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

Conforme foi apresentado, a validação inicial é realizada em cada par de estações individualmente, fato este que não permite a identificação de possíveis erros relacionados ao receptor, ou falsas anomalias ionosféricas causadas por erros de pós-processamento ou ainda erros no processo de estimação do DCB do receptor. Desta forma, é necessária a realização de uma validação final, sendo os gradientes validados parcialmente para cada par comparados com os gradientes de pares de estações vizinhas, ou, pode-se também, comparar os valores de atrasos que proporcionam os gradientes validados com os atrasos de estações vizinhas. Se os pares de estações (ou estações) nas proximidades do par em estudo apresentar um comportamento de gradiente ou de atraso similar, tem-se que o evento observado é mais propício ser de origem ionosférica do que falha ou erro em um receptor, pois, caso contrário, dificilmente a falha ou erro acometeria todos os receptores na circum-vizinhança (KIM et al., 2015; DATTA-BARUA et al., 2010).

Seguindo a sequência de exemplos, a Figura 7 mostra os valores de atrasos ionosféricos inclinados L1/L2 e L1 das estações em análise YOSU e HADG, além dos valores para as estações vizinhas JINJ e SORI, bem como o gradiente CMC para quatro pares de estações, incluindo YOSU-HADG. Nota-se que os resultados apresentam um comportamento similar ao longo do tempo, permitindo concluir definitivamente que os gradientes ionosféricos máximos obtidos para o par YOSU-HADG são devidos a eventos ionosféricos.

4.6 Determinação do limite do gradiente ionosférico e estimativa dos demais parâmetros do modelo

Analisados e validados os gradientes ionosféricos para todos os dias anômalos selecionados, determinam-se os limites máximos que os gradientes podem apresentar por meio da plotagem dos gradientes em função do ângulo de elevação dos satélites. Os limites são ajustados aos pontos do gráfico, de forma a limitar superiormente o espaço de risco. Caso seja observada uma relação entre os gradientes e a elevação dos satélites, o limite pode ser segregado em retas horizontais e inclinadas, diferentemente quando não há relação, sendo o limite representado por uma constante. Ressalva-se que, antes da definição dos limites, uma margem conservadora (geralmente 15%) é adicionada aos valores dos gradientes validados com intuito de contemplar os erros de medidas e de processamento de dados ocorridos durante o desenvolvimento do modelo (KIM et al., 2015; DATTA-BARUA et al., 2010).

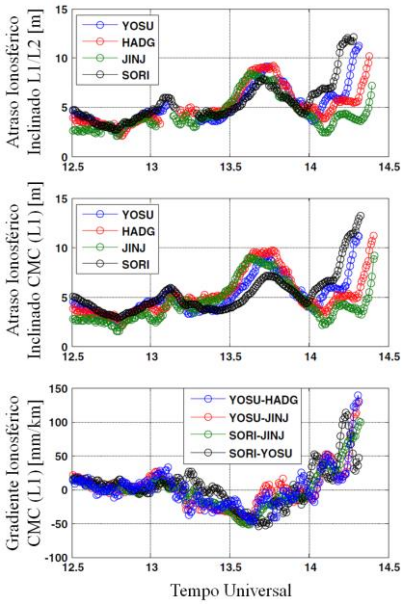

Figura 7 – Exemplo de resultados de atraso ionosférico inclinado L1/L2, CMC e gradiente ionosférico CMC para um satélite GPS de quatro estações do *Korean Threat Model*. Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

Na Figura 8 são apresentados os gradientes ionosféricos validados do modelo de risco sul-coreano para cada dia anômalo selecionado, bem como, o limite máximo dos gradientes, representado por uma constante de 160 mm/km (linha vermelha). São mostrados também na figura os limites do *CONUS Threat Model*, representados por três retas pretas em função da elevação.

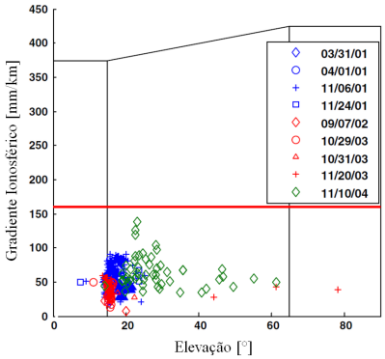

Figura 8 – Relação do *Korean Threat Model* e *CONUS Threat Model*. Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

Caso os limites dos gradientes de um modelo de risco, desenvolvido para uma determinada região, sejam inferiores aos limites do *CONUS Threat Model* pode-se

certificar que a estação GBAS da Honeywell atende os requisitos de integridade para aproximações precisas de aeronaves nesta região, pois este tipo de estação GBAS foi desenvolvido tendo como referência o *CONUS Threat Model*. O caso supracitado aplica-se para o modelo sul-coreano.

Os demais parâmetros do modelo de risco (velocidade e extensão da frente ionosférica e valor máximo de atraso ou de TEC) são obtidos para os períodos em que os gradientes ionosféricos máximos são validados, sendo as equações apresentadas na seção 2.

5 EXEMPLOS DE MODELOS DE RISCO

5.1 *CONUS Threat Model*

Para o desenvolvimento do *CONUS Threat Model* foram utilizados dados GNSS de dupla frequência de estações da rede CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) referentes a 10 dias entre os anos de 2000 e 2004. Os limites e variações dos parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 1. Já a Figura 9 mostra os limites dos gradientes ionosféricos em forma de gráfico.

Tabela 1 – Limites e variações dos parâmetros do *CONUS Threat Model*.

Parâmetro	Limite ou Variação do Parâmetro	
Gradiente Ionosférico Máximo	Elev. < 15°	375 mm/km
	15° < Elev. < 65°	375 + 50*(Elev. – 15°)/50 mm/km
	Elev. > 65°	425 mm/km
Velocidade da Frente Ionosférica	0 – 750 m/s	
Extensão da Frente Ionosférica	25 – 200 km	
Valor Máximo de Atraso Ionosférico	50 m	

Fonte: Datta-Barua et al. (2010).

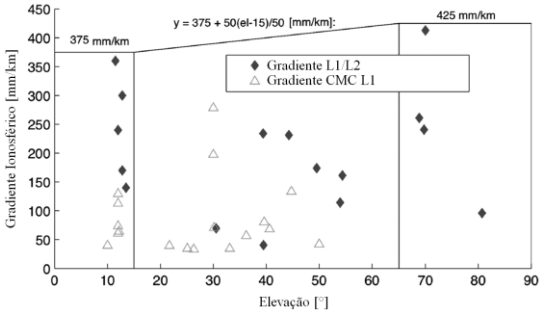

Figura 9 – Limites dos gradientes ionosféricos do *CONUS Threat Model*. Fonte: Adaptado de Datta-Barua et al. (2010).

5.2 *Low Latitude Threat Model*

A Mirus Technology dos Estados Unidos, em conjunto com pesquisadores da FAA (*Federal Aviation Administration*), Stanford University, Boston College, INPE, ICEA (Instituto de Controle do Espaço Aéreo), UNESP e KAIST (*Korea Advanced Institute of Science and Technology*) executaram um projeto, entre outubro de 2013 e janeiro de 2015, com o intuito de desenvolver, validar e implementar um modelo de risco ionosférico para regiões de baixas latitudes, visando dar suporte as operações GBAS no espaço aéreo brasileiro.

Utilizando dados de 120 dias das estações das redes RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), LISN (*Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*), CIGALA/CALIBRA e ICEA, referentes ao período do ciclo solar 24, foram obtidos gradientes ionosféricos que superam os limites do *CONUS Threat Model*, conforme mostra a Figura 10.

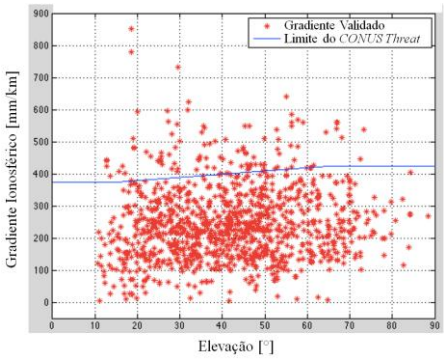

Figura 10 – Gradientes ionosféricos obtidos pelo *Low Latitude Threat Model.* Adaptado de USTDA (2015).

Algumas características e ressalvas destacadas pelos pesquisadores do projeto a cerca do modelo são (USTDA, 2015): o modelo é limitado devido ao curto período do projeto e a baixa atividade solar no ciclo 24, sendo necessária a utilização de dados do ciclo solar anterior e dos subsequentes para uma melhor modelagem; o modelo fornece uma representação geral do risco ionosférico para o espaço aéreo brasileiro, entretanto, não é recomendado para aplicações regionais; todos os gradientes ionosféricos máximos estimados pelo modelo foram obtidos durante o período das 22h às 5h TU; a maioria dos gradientes estimados é proveniente de pares de estações paralelas ao equador magnético; somente uma abordagem superficial para a determinação da velocidade e extensão da frente ionosférica foi realizada; e os maiores valores de gradientes foram obtidos por pares de estações cujas linhas de base são próximas a 10 km, o que não podem ser considerados como representativos para todo o território brasileiro.

5.3 *Korean Threat Model*

A elaboração do modelo de risco ionosférico sul-coreano envolveu a análise de 22 dias durante os anos de 2000 e 2004. No total, 63 estações foram utilizadas para a obtenção dos gradientes, cujos valores foram inferiores aos limites do *CONUS Threat Model*. Conforme apresentado pela Figura 8, o limite máximo dos gradientes foi definido como sendo uma constante de 160 mm/km (KIM et al., 2015).

Determinações e análises a respeito da velocidade e extensão da frente ionosférica e do valor máximo de atraso ionosférico não foram realizadas no

desenvolvimento do modelo, pois, de acordo com Kim et al. (2015) e Lee et al. (2011), estes parâmetros não influenciam na avaliação do sistema GBAS. No entanto, os mesmos autores destacam que os parâmetros citados são importantes para uma melhor compreensão do comportamento da ionosfera em condições anômalas.

5.4 *German Threat Model*

O modelo de risco alemão foi desenvolvido utilizando dados do IGS, do EPN (*EUREF Permanent Network*), do GREF (*German Geodetic Reference Network*) e das estações SAPOS (*Satellite Positioning Service of the German State Survey*). Dezesseis períodos entre os anos de 1998 e 2008 foram analisados (MAYER et al., 2009). Os limites dos gradientes ionosféricos em função da elevação dos satélites são apresentados na Tabela 2 e na Figura 11.

Tabela 2 – Limites dos gradientes ionosféricos do *German Threat Model*.

Parâmetro	Limites do Parâmetro	
Gradiente Ionosférico Máximo	5° < Elev. ≤ 30°	40 mm/km
	30° < Elev. ≤ 70°	40 + 2,5*(Elev. – 30°) mm/km
	70° < Elev. ≤ 90°	140 mm/km

Fonte: Mayer et al. (2009).

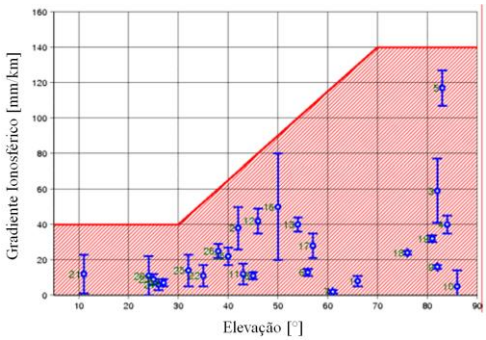

Figura 11 – Limites dos gradientes ionosféricos do *German Threat Model.* Fonte: Adaptado de Mayer et al. (2009).

Os gradientes ionosféricos obtidos no território alemão são bem menores que os gradientes do CONUS. Entretanto, foram determinadas velocidades maiores que 1.000 m/s. (MAYER et al., 2009).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os conceitos apresentados são essenciais para o desenvolvimento de um modelo de risco ionosférico para uma determinada região.

Neste cenário, tem-se em desenvolvimento no âmbito do INCT (Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia) GNSS-NavAer um modelo de risco ionosférico para GBAS no Brasil no contexto do GNSS, com ênfase para a abordagem temporal-espacial. Resultados iniciais foram apresentados numa qualificação de Doutorado e serão publicados oportunamente (PEREIRA, 2017).

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à bolsa de doutorado (FAPESP – proc. n° 2015/20522-7), ao INCT GNSS-NavAer (CNPq – proc. n° 465648/2014-2) e à bolsa PQ (CNPq – proc. n° 309832/2016-0).

REFERÊNCIAS

DATTA-BARUA, S.; LEE, J.; PULLEN, S.; LUO, M.; ENE, A.; QIU, D.; ZHANG, G.; ENGE, P. Ionospheric threat parameterization for local area Global-Positioning-System-Based aircraft landing systems. **Journal of Aircraft**, v. 47, n. 4, p. 1141-1151, 2010. doi:10.2514/1.46719

DATTA-BARUA, S.; WALTER, T.; PULLEN, S.; LUO, M.; BLANCH, J.; ENGE, P. Using WAAS ionospheric data to estimate LAAS short baseline gradients. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2002, San Diego. **Electronic proceedings…**San Diego, Jan. 2002. p. 523-530.

JUNG, S.; LEE, J. Long-term ionospheric anomaly monitoring for Ground Based Augmentation Systems. **Radio Science**, v. 47, RS4006, 2012. doi:10.1029/2012RS005016

KIM, M.; CHOI, Y.; JUN, H. S.; LEE, J. GBAS ionospheric threat model assessment for category I operation in the Korean region. **GPS Solutions**, v. 19, n. 3, 2015. doi:10.1007/s10291-014-0404-6

KOMJATHY, A.; SPARKS, L.; MANNUCCI, A. J. A new algorithm for generation high precision ionospheric ground-truth measurements for FAA's Wide Area Augmentation System. **JPL Supertruth Document**, v. 1, 2004.

LEE, J.; PULLEN, S.; DATTA-BARUA, S.; ENGE, P. Assessment of ionosphere spatial decorrelation for Global Positioning System-Based aircraft landing systems. **Journal of Aircraft**, v. 44, n. 5, p. 1662-1669, 2007. doi:10.2514/1.28199

LEE, J.; SEO, J.; PARK, Y. S.; PULLEN, S.; ENGE, P. Ionospheric threat mitigation by geometry screening in Ground-Based Augmentation Systems. **Journal of Aircraft**, v. 48, n. 4, p. 1422–1433, 2011. doi:10.2514/1.C031309

MA, G. MARUYAMA, T. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. **Annals of Geophysics**, v. 21, n. 10, p. 2083-2093, 2003. doi:10.5194/angeo-21-2083-2003

MAYER, C.; BELABBAS, B.; JAKOWSKI, N.; MEURER, M.; DUNKEL, W. Ionosphere threat space model assessment for GBAS. In: ION/GNSS, 2009, Savannah. **Electronic proceedinds…** Savannah: ION/GNSS, 2009. p. 1091-1099.

PEREIRA, V. A. S. **Modelo de risco ionosférico para GBAS no Brasil no contexto do GNSS**. 2017. Tese (Doutorado) – FCT/UNESP, Presidente Prudente (em desenvolvimento).

SRINIVAS, V. S.; SARMA, A. D.; REDDY, A. S.; REDDY, D. K. Investigation of the effect of ionospheric gradients on GPS signals in the context of LASS. **Progress In Electromagnetics Research B**, v. 57, p.191-205, 2014.

USTDA. U.S. Trade and Development Agency**. Effects of Low Latitude Ionospheric Activity on Global Navigation Satellite System (GNSS)**. Relatório Final, jan. 2015.