ESTIMATIVA DE NÍVEIS DE PROTEÇÃO PARA APROXIMAÇÃO NO AEROPORTO TOM JOBIM (SBGL) UTILIZANDO VALORES DE SIGMA-VIG PARA CADA SATÉLITE DAS CONSTELAÇÕES GPS E GLONASS

Vinícius Amadeu Stuani Pereira
Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, Bairro Centro Educacional, 19060-900, Presidente Prudente/SP
+55 (18) 3229-5506, vi_stuani@hotmail.com

João Francisco Galera Monico
Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT
Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305, Bairro Centro Educacional, 19060-900, Presidente Prudente/SP
+55 (18) 3229-5511, galera.monico@unesp.br

Paulo de Oliveira Camargo
Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT
Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305, Bairro Centro Educacional, 19060-900, Presidente Prudente/SP
+55 (18) 3229-5516, paulo.camargo@unesp.br

RESUMO

Determinações do sigma-VIG em tempo real de cada satélite GPS e GLONASS disponível no GBAS/SBGL foram utilizadas nas estimativas de HPL/VPL. Uma vez que tais estimativas transmitem a real condição ionosférica no momento da aproximação de uma aeronave, elas permitem também realizar o *Screening* dos dados. Experimentos indicam que é possível atender CAT-I utilizando satélites GPS ou GLONASS desde que sejam aplicadas as restrições estabelecidas por um modelo de risco ionosférico local-temporal. A utilização dos satélites GLONASS em concomitância com o GPS possibilita a obtenção de valores que atendem HAL/VAL CAT-III, uma vez que se tem uma melhor configuração geométrica.

Palavras-chave: GBAS, sigma-VIG, níveis de proteção, CAT, GNSS.

1. INTRODUÇÃO

Entre os métodos de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que podem ser utilizados na navegação aérea para auxiliar a fase de aproximação precisa se destaca o GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008).

O sistema de aumento baseado em estações terrestres possui a capacidade de correção da maioria dos erros que afetam a pseudodistância a partir do uso do DGNSS (*Differential GNSS*), levando em consideração que a camada ionosférica tenha um comportamento similar na circunvizinhança do aeroporto. Entretanto, dependendo do fluxo de ionização solar, do ciclo de manchas solares, da atividade geomagnética, hora local e localização geográfica, a ionosfera pode sofrer fortes perturbações, acarretando em risco à integridade do GBAS, uma vez que os efeitos ionosféricos podem ser diferentes para pequenas distâncias.

Várias pesquisas a respeito dos erros sistemáticos devido à camada ionosférica no GBAS têm sido realizadas, como por exemplo: Luo et al. (2003), Luo et al. (2005), Ene et al. (2005), Lee et al. (2007), Pullen et al. (2009), Mayer et al. (2009), Datta-Barua et al. (2010), Lee et al. (2011a), Lee et al. (2011b), Jung e Lee (2012), Wang et al. (2014), Kim et al. (2014), Yoon e Lee (2014), Srinivas et al. (2014) e Kim et al. (2015).

Assim, modelos de risco ionosférico, que determinam a máxima decorrelação espacial ionosférica existente entre o GBAS e a aeronave que se aproxima num aeroporto, foram desenvolvidos ou avaliados, principalmente para o território norte-americano, onde se destaca o *CONUS* (*Conterminous United States*) *Threat Model*. Nessa área o comportamento da ionosfera é mais estável em comparação com o Brasil, localizado na região equatorial, caracterizada por condições adversas, tais como: Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), bolhas ionosféricas, irregularidades ionosféricas, cintilação ionosférica e Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS).

O crescente aumento de voos nacionais e internacionais no Brasil, concomitantemente com a implantação de um GBAS SLS-4000 da empresa norte-americana Honeywell, por meio do DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo), no aeroporto internacional Tom Jobim (Galeão – código ICAO SBGL) no Rio de Janeiro/RJ em 2011, despertou para a necessidade de estudos sobre modelo de risco para o setor brasileiro. Sendo o equipamento certificado, a princípio, para operação apenas nos Estados Unidos, qualquer usuário interessado em utilizá-lo deve estimar os parâmetros do *CONUS Threat Model* para a região de interesse, e verificar se os valores atendem os limiares estabelecidos.

Entre os parâmetros de integridade transmitidos pelo GBAS há o desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical, conhecido por sigma-VIG (σ_{vig}), o qual é utilizado, juntamente com outros parâmetros, para determinar os níveis de proteção horizontal (HPL – *Horizontal Protection Level*) e vertical (VPL – *Vertical Protection Level*) da aeronave na fase de aproximação precisa. Com unidade em mm/km (ou m/m), o limiar de 4 mm/km para o desvio-padrão do gradiente é o suficiente para atender todas as situações ionosféricas atuantes no modelo do CONUS, considerando todos os satélites GPS (*Global Positioning System*) e invariavelmente da distância entre o GBAS e aeronave (LEE et al., 2007).

Assim, o trabalho visa apresentar a estimativa dos níveis HPL e VPL para aproximações precisas CAT-I e CAT-III, com o intuito de compará-los com os limites de alerta HAL (*Horizontal Alert Limit*) e VAL (*Vertical Alert Limit*), estabelecidos pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*). Para isso são utilizados valores de σ_{vig} em tempo real de cada satélite GPS e GLONASS disponível e para intervalos de distância de 50 em 50 km (inferior aos 100 km de LEE et al., 2007) entre o GBAS localizado no aeroporto SBGL e a aeronave.

2. GBAS

GBAS foi desenvolvido para o uso em aproximações de precisão CAT-I, com possibilidade de contemplar CAT-II e CAT-III. Tais aproximações são realizadas por aeronaves equipadas com receptor GNSS, o

qual utiliza as mensagens transmitidas via VHF (*Very High Frequency*) do GBAS instalado próximo à pista de um aeroporto.

As mensagens GBAS contêm correções diferenciais de pseudodistância (Tipo 1), parâmetros de integridade (Tipo 2) e trajetórias de aproximação precisa (Tipo 4). A Figura 1 ilustra a arquitetura de um GBAS.

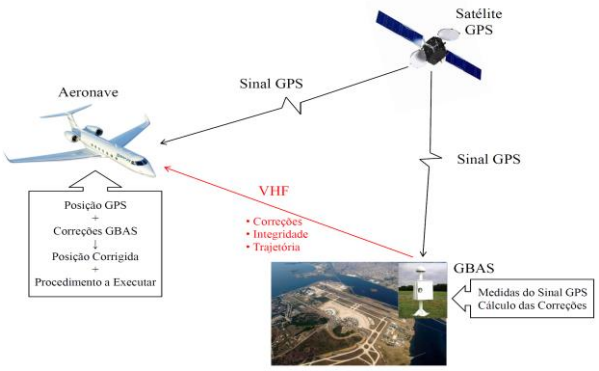


Figura 1: Arquitetura de um GBAS

As correções diferenciais de pseudodistância são obtidas utilizando um conjunto de estações de referência (geralmente 4), equipadas com receptores de simples frequência (L1), instaladas em pontos de coordenadas conhecidas e utilizando o conceito de DGNSS. Ressalta-se que o sistema faz o uso somente da L1, pois, por questões de segurança, a utilização da portadora L2 não é autorizada pela ICAO na navegação aérea (ICAO, 2013b). No entanto, Tang et al. (2009) realizaram alguns experimentos com as frequências L1 e L2 e obtiveram uma melhora no posicionamento, mas também indicaram a ocorrência de um maior índice de ruído no sinal devido a L2. Destaque-se também que a modernização do GPS, a partir da disponibilização da L5 pelos satélites do bloco IIF, permite minimizar o erro introduzido pela ionosfera. Com base em Circiu et al. (2014), a utilização dos sinais da L1 e da L5 no GBAS poderá melhorar, consideravelmente, as correções dos efeitos da ionosfera por meio da combinação *ion-free* ou por meio da filtragem da pseudodistância pela fase da portadora.

Para que o GBAS atenda os requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO, ou seja, HPL < HAL e VPL < VAL (Figura 2), limites devem ser estabelecidos na variação dos erros ionosféricos entre a aeronave que se aproxima e as estações de referência, de modo a minimizar a perda de disponibilidade (DATTA-BARUA et al., 2002).

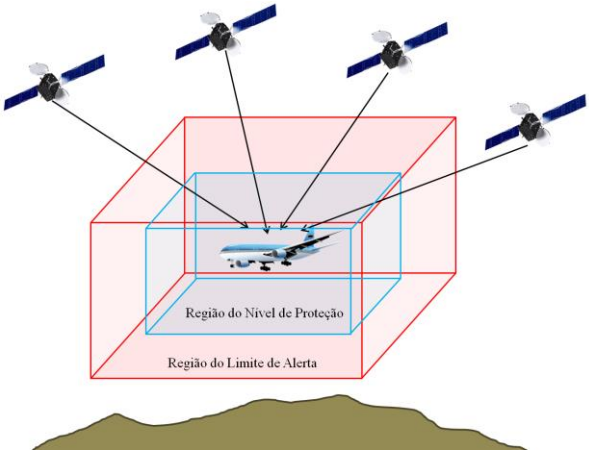


Figura 2: Regiões do nível de proteção e do limite de alerta na navegação aérea (LEE, 2005)

Com objetivo de determinar esses limites, a configuração do GBAS a ser modelada é aquela em que as estações de referência e o receptor da aeronave rastreiem, simultaneamente, um determinado número mínimo de satélites, cujos sinais sejam submetidos a atrasos devido à ionosfera. Entretanto, tais atrasos não são iguais quando as linhas de visadas forem diferentes. Em contrapartida, à medida que a aeronave se aproxima das estações em solo, a diferença entre os erros ionosféricos tende a ser reduzida (DATTA-BARUA et al., 2002).

Diante à problemática, pesquisadores da *Stanford University* dos Estados Unidos desenvolveram um modelo de risco ionosférico, nomeado de *CONUS Threat Model*, a fim de estimar a máxima decorrelação espacial existente entre o atraso (erro) proporcionado de um satélite a uma estação de referência e o atraso do sinal desse mesmo satélite ao receptor da aeronave. Tal estimativa é denominada de gradiente ionosférico (DATTA-BARUA et al., 2010).

3. MODELO CONUS DE RISCO IONOSFÉRICO

No modelo CONUS de risco ionosférico a AIE e as irregularidades ionosféricas são representadas como uma “frente de onda” ou “frente ionosférica”, que se desloca com uma

determinada velocidade horizontal, proporcionando gradientes de erro ionosférico (MAYER et al., 2009). A representação de uma frente ionosférica é apresentada na Figura 3, sendo os parâmetros do modelo o gradiente ionosférico, a velocidade e extensão da frente e o valor máximo de TEC (*Total Electron Content*) ou de atraso ionosférico.

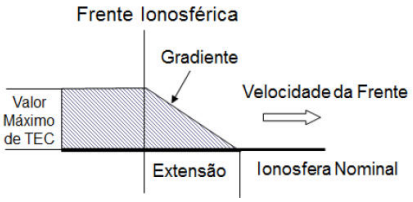


Figura 3: Representação de uma frente ionosférica (LEE, 2005)

Os limites dos parâmetros são obtidos a partir do processamento de um conjunto de dados que contemplam dias em que há alta variabilidade na densidade eletrônica da camada ionosférica. Os resultados são apresentados em função do ângulo de elevação dos satélites para o caso dos gradientes, em termos de valores máximos e mínimos para a velocidade e extensão e o valor máximo de TEC (ou atraso ionosférico), não havendo variação temporal para os valores.

A metodologia para a determinação dos parâmetros pode ser encontrada em Pereira et al. (2017), Srinivas et al. (2014), Bumrungkit et al. (2014), Mayer et al. (2009) e Ene et al. (2005).

Para verificar se os limites dos parâmetros do modelo de risco podem ser utilizados numa região, uma das possibilidades existentes consiste em utilizar uma densa rede de estações de monitoramento contínuo dos sinais GNSS, pois, dentre uma das alternativas de desenvolvimento do modelo tem-se a que utilize pares de estações (*station-pair method*), onde uma estação do par simula um GBAS e a outra uma aeronave (LEE et al., 2007). Outra possibilidade é a utilização de simuladores GNSS, sendo necessário nesse caso o conhecimento *a priori* das condições ionosféricas atuantes na região do GBAS.

Para o desenvolvimento do modelo do CONUS foram utilizados dados GPS (portadoras L1 e L2) de estações da rede CORS (*Continuously Operating Reference Station*) referentes a 10 dias entre os anos de 2000 e 2004. Os limites e variações dos parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 1 e na Figura 4.

Tabela 1: Limites e variações dos parâmetros do *CONUS Threat Model* (DATTA-BARUA et al., 2010)

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	0 – 750 m/s	
Extensão	25 – 200 km	
Atraso Ionosférico Máximo	50 m	

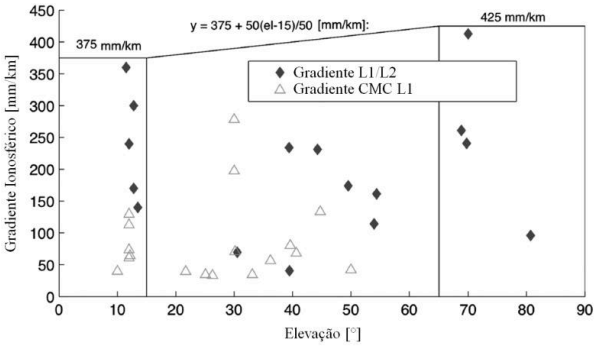


Figura 4: Limites dos gradientes ionosféricos do *CONUS Threat Model* (DATTA-BARUA et al., 2010)

4. ESTIMATIVA DO σ_{vig}

Kolb et al. (2005) e Datta-Barua et al. (2002), ao analisarem gradientes ionosféricos verticais para a Alemanha e Estados Unidos, respectivamente, obtiveram o valor de 1 mm/km (1σ) para σ_{vig} em dias nominais. Entretanto, esse valor não é rigoroso o suficiente para garantir que os níveis de proteção atendam os requisitos de navegação aérea devido à dois motivos: primeiro, o método descrito para o cálculo dos níveis de proteção assume média zero e distribuição gaussiana para a decorrelação espacial ionosférica, sendo que os gradientes ionosféricos não apresentam, necessariamente, média zero e distribuição normal; segundo, num GBAS não se consegue distinguir condições ionosféricas nominais de anômalas em tempo real. Dessa forma é necessário que o valor de σ_{vig} transmitido contemple todas as condições ionosféricas (LEE et al., 2007).

Assim, Lee et al. (2007) elaboraram um método para a estimativa do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical de forma mais rigorosa, designado de *Sigma Overbounding Method*. O método consiste na análise das funções de densidade de probabilidade (FDP) de gradientes ionosféricos verticais normalizados, obtidos para dias ionosféricos ativos e nominais, com o intuito de obter um fator de inflação (f) que, ao multiplicar a dstribuição gaussiana 1σ, obtém uma distribuição que se adeque de fato a real distribuição dos gradientes.

Os passos do *Sigma Overbounding Method* são: os gradientes verticais são divididos em intervalos (blocos) de acordo com as distâncias das estações que formam os pares, ou seja, em intervalos de 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km, 200-250 km e outros, por exemplo; a média (μ_{vig}) e o desvio-padrão (σ_{vig}) dos gradientes ionosféricos verticais são então calculados para cada intervalo e utilizados para normalizar os gradientes de cada bloco; assim, com base na FDP dos gradientes ionosféricos verticais normalizados determina-se o fator de inflação (f) para cada intervalo utilizando conceitos de assimetria e curtose. A Figura 5 apresenta o exemplo de uma FDP de gradientes ionosféricos verticais normalizados da região norte-americana para o dia 2 de julho de 2000.

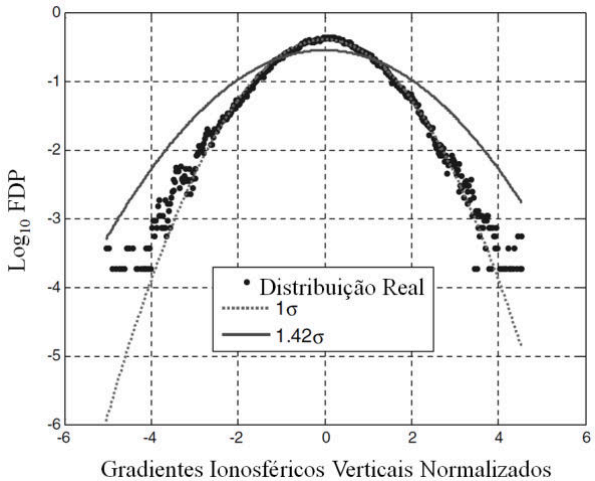


Figura 5: FDP de gradientes ionosféricos verticais normalizados da região dos Estados Unidos para 2 de julho de 2000 (LEE et al., 2007)

A partir da Figura 5 observa-se que a real distribuição dos dados não possuem caldas gaussianas. Dessa forma a distribuição gaussiana N(0,1σ) deve ser multiplicada pelo fator de inflação de 1,42 para que as caldas da distribuição real sejam contempladas (LEE et al., 2007).

Por fim, o "σ_{vig} inflacionado" (σ_{vig_infla}) é calculado para cada intervalo utilizando a equação (1) (LEE et al., 2007).

$$\sigma_{vig_infla} = \left|\mu_{vig}\right| + f \cdot \sigma_{vig} \qquad (1)$$

Valores de σ_{vig_infla} obtidos para o *CONUS Threat Model*, referentes aos dias ionosféricos nominais e anômalos, são apresentados na Figura 6.

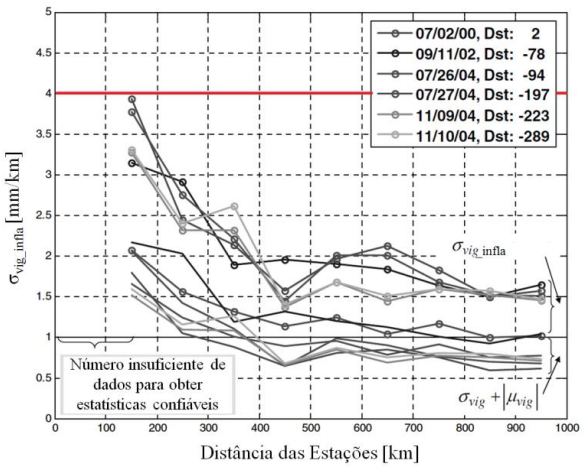


Figura 6: Valores de σ_{vig_infla} do *CONUS Threat Model* referentes aos dias ionosféricos nominais e anômalos (LEE et al., 2007)

Os resultados indicam que um σ_{vig_infla} de 4 mm/km (linha vermelha) é suficiente para atender todas as condições ionosféricas atuantes no *CONUS Threat Model* (LEE et al., 2007).

5. ESTIMATIVA DO HPL E VPL

A aeronave deve estimar em tempo real os níveis de proteção (PL – *Protection Level*), que são determinados de modo a atender o seguinte requisito:

$$\text{Prob}\left(\text{erro posicional verdadeiro} > \text{PL}\right) \leq \alpha \qquad (2)$$

onde os níveis de proteção devem sobrepor o erro posicional verdadeiro, que é desconhecido em tempo real, com uma probabilidade de (1 – α), coincidente com o valor de integridade da Tabela 2 para as operações CAT-I, II e III.

Tabela 2: Requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO para CAT-I, II e III (ICAO, 2013a)

Operação de Voo	*Acurácia Horizontal (95%)*	*Acurácia Vertical (95%)*	*Integridade*	*Continuidade*	*HAL*	*VAL*	*Disponi-bilidade*	*Tempo para Alerta*
CAT-I	16 m	4 a 6 m	$1\text{-}2\text{x}10^{-7}$ por aproximação	$1\text{-}8\text{x}10^{-6}$ em 15 s	40 m	10 a 12 m	0,99 a 0,99999	6 s
CAT-II	6,9 m	2 m	$1\text{-}1\text{x}10^{-9}$ em 15 s	$1\text{-}4\text{x}10^{-6}$ em 15 s	17,3 m	5,3 m	0,99 a 0,99999	1 s
CAT-III	6,2 m	2 m	$1\text{-}1\text{x}10^{-9}$ em 30 s (lateral) $1\text{-}1\text{x}10^{-9}$ em 15 s (vertical)	$1\text{-}2\text{x}10^{-6}$ em 30 s (lateral) $1\text{-}2\text{x}10^{-6}$ em 15 s (vertical)	15,5 m	5,3 m	0,99 a 0,99999	1 s

Reescrevendo a equação da pseudodistância de um determinado satélite (s) registrada por um receptor (r) em termos das coordenadas geodésicas cartesianas (x,y,z) obtém-se (MONICO, 2008):

$$PD_r^s = \sqrt{\left(x^s - x_r\right)^2 + \left(y^s - y_r\right)^2 + \left(z^s - z_r\right)^2} + c\left(dt_r - dt^s\right) + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + Orb^s + \nu_{PD_r^s} \quad (3)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, dt_r e dt^s os erros dos relógios do receptor e do satélite em relação ao tempo GPS, respectivamente, I_r^s, T_r^s, dm_r^s e Orb^s os erros devido à ionosfera, troposfera, multicaminho e posição do satélite, respectivamente, e $\nu_{PD_r^s}$ os erros sistemáticos não modelados e erros aleatórios.

Substituindo o termo dos erros dos relógios $c\left(dt_r - dt^s\right)$ da equação (3) por dt, e os erros devido à ionosfera, troposfera, multicaminho, posição do satélite e erros sistemáticos não modelados e aleatórios por apenas $\tilde{\varepsilon}$, têm-se:

$$PD_r^s = \sqrt{\left(x^s - x_r\right)^2 + \left(y^s - y_r\right)^2 + \left(z^s - z_r\right)^2} + dt + \tilde{\varepsilon} \quad (4)$$

Como são rastreados N satélites pelo receptor da aeronave, haverá assim N equações de pseudodistâncias registradas (s = 1, 2, ..., N). Para obter as correções diferenciais na pseudodistância devem-se calcular as respectivas distâncias geométricas entre o receptor e os N satélites a partir do uso das coordenadas geodésicas aproximadas (x_{r0}, y_{r0}, z_{r0}) e dos erros aproximados dos relógios do receptor e dos satélites (dt_0) (LEE, 2005), conforme apresentado na equação (5):

$$\rho_{r0}^s = \sqrt{\left(x^s - x_{r0}\right)^2 + \left(y^s - y_{r0}\right)^2 + \left(z^s - z_{r0}\right)^2} + dt_0 \quad (5)$$

Assim, realizando a diferença entre as pseudodistâncias contidas no arquivo de observação (PD_r^s) e as distâncias geométricas calculadas (ρ_{r0}^s) obtêm-se as correções diferenciais (Δp_r^s), cujo modelo funcional matricial é dado por (LEE, 2005):

$$\Delta p_r^s = A\begin{bmatrix} x_r - x_{r0} \\ y_r - y_{r0} \\ z_r - z_{r0} \\ dt - dt_0 \end{bmatrix} + \tilde{\varepsilon} = A\begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta dt \end{bmatrix} + \tilde{\varepsilon} \quad (6)$$

onde Δp_r^s é um vetor N x 1 contendo as correções diferenciais de pseudodistância para cada satélite e A é a matriz *design* (jacobiana) receptor-satélite, constituída por N linhas de vetores de linhas de visada ($L^{(N)}$), acrescidas por "1" devido ao erro do relógio (LEE, 2005). Uma forma alternativa de se obter os elementos da matriz A é apresentada por Srinivas et al. (2014), em função do azimute (Az) e da elevação (E) de cada satélite em um sistema de coordenadas geodésico local, com origem no receptor da aeronave. A matriz da equação (7) apresenta tais elementos.

$$A = \begin{bmatrix} \cos E^{(1)} \cos Az^{(1)} & \cos E^{(1)} \operatorname{sen} Az^{(1)} & \operatorname{sen} E^{(1)} & 1 \\ \cos E^{(2)} \cos Az^{(2)} & \cos E^{(2)} \operatorname{sen} Az^{(2)} & \operatorname{sen} E^{(2)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos E^{(N)} \cos Az^{(N)} & \cos E^{(N)} \operatorname{sen} Az^{(N)} & \operatorname{sen} E^{(N)} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dessa forma, considerando como incógnita o vetor que contém as coordenadas cartesianas do receptor da aeronave e os erros dos relógios ($[\Delta x_r \ \Delta y_r \ \Delta z_r \ \Delta dt]^T$), a solução é obtida aplicando o ajustamento de observações pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), dada pela equação (8):

$$\begin{bmatrix} \Delta\hat{x}_r \\ \Delta\hat{y}_r \\ \Delta\hat{z}_r \\ \Delta\hat{dt} \end{bmatrix} = \left(A^T P A\right)^{-1} A^T P \, \Delta p_r^s \quad (8)$$

sendo P a matriz peso diagonal, de ordem N, das medidas de pseudodistância, uma vez que se assume que os erros de medidas não são correlacionados e que possuem distribuição gaussiana (LEE, 2005). A matriz P é determinada por:

$$P = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{PD}^{2\,(1)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{PD}^{2\,(2)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/\sigma_{PD}^{2\,(N)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para cada medida de pseudodistância de cada satélite (s) assume-se o seguinte modelo de erro (SRINIVAS et al., 2014; LEE, 2005):

$$\sigma_{PD}^{2\,(s)} = \sigma_{aeronave}^{2\,(s)} + \sigma_{troposfera}^{2\,(s)} + \sigma_{ionosfera}^{2\,(s)} + \sigma_{estação}^{2\,(s)} \quad (10)$$

onde o erro devido à aeronave ($\sigma_{aeronave}$), dado pela equação (11), é determinado a partir do ruído do receptor e de um modelo específico de multicaminho, os erros devido à troposfera ($\sigma_{troposfera}$), equação (14), e à ionosfera ($\sigma_{ionosfera}$), equação (15), estimados a partir de erros residuais, e o erro devido à estação ($\sigma_{estação}$) calculado por meio de um modelo de multicaminho e de ruídos do receptor da estação de referência, a partir da equação (17) (LEE, 2005).

$$\sigma_{aeronave}^{(s)} = \sqrt{\sigma_{ruído}^{2\,(s)} + \sigma_{multicaminho}^{2\,(s)}} \quad (11)$$

sendo:

$$\sigma_{ruído}^{(s)} = a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{E^{(s)}}{E_c}} \quad (12)$$

$$\sigma_{multicaminho}^{(s)} = 0{,}13 + 0{,}53 \cdot e^{-E^{(s)}/10^{\circ}} \quad (13)$$

onde a_0, a_1 e E_c são os designadores de acurácia da aeronave (AAD – *Airborne Accuracy Designator*).

$$\sigma_{troposfera}^{(s)} = \sigma_N h_0 \cdot \frac{10^{-6}}{\sqrt{0{,}002 + \operatorname{sen}^2 E^{(s)}}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-\Delta h}{h_0}}\right) \quad (14)$$

sendo σ_N a incerteza do índice de refratividade (adimensional), h_0 a altura da camada trosposférica e Δh a altura da aeronave em relação às estações de referência do GBAS, todos transmitidos nas mensagens GBAS.

$$\sigma_{ionosfera}^{(s)} = F_{pp}^{(s)} \cdot \sigma_{vig} \cdot \left(X_{aeronave} + 2 \cdot \tau \cdot V_{aeronave}\right) \quad (15)$$

onde $F_{pp}^{(s)}$ consiste no fator de obliquidade, que converte de vertical para inclinado para um satélite (s), apresentado na equação (16), $X_{aeronave}$ a distância inclinada entre a aeronave e o GBAS, τ o tempo constante do filtro de suavização (em geral 100 segundos) e $V_{aeronave}$ a velocidade horizontal da aeronave.

$$F_{pp}^{(s)} = \left[1 - \left(\frac{R_m \cos E^{(s)}}{R_m + h_m}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (16)$$

com R_m o raio médio da Terra (6.371 km) e h_m a altura média da camada ionosférica.

$$\sigma_{estação}^{(s)} = \sqrt{\frac{\left(a_0 + a_1 \cdot e^{\frac{-E^{(s)}}{E_0}}\right)^2}{M} + a_2^2} \quad (17)$$

sendo M o número de estações de referência operantes no GBAS e a_0, a_1, a_2 e E_0 os designadores de acurácia da estação de referência (GAD – *Ground Accuracy Designator*).

Para fins de simplificação, determina-se a matriz de projeção S (4 x N) por (LEE, 2005):

$$S = \left(A^T P A\right)^{-1} A^T P \quad (18)$$

Assim, definidos todos os vetores e matrizes do ajustamento, obtêm-se os desvios-padrões dos erros de posição horizontal e vertical a partir das equações (19) e (20):

$$\sigma_{\text{Erro Posição Horizontal}} = \sqrt{\sum_{s=1}^{N} S_{horizontal}^{2\,(s)} \cdot \sigma_{PD}^{2\,(s)}} \quad (19)$$

$$\sigma_{\text{Erro Posição Vertical}} = \sqrt{\sum_{s=1}^{N} S_{vertical}^{2\,(s)} \cdot \sigma_{PD}^{2\,(s)}} \quad (20)$$

sendo $S_{horizontal}^{(s)}$ e $S_{vertical}^{(s)}$ as componentes horizontal e vertical da matriz S para um satélite (s), respectivamente. Para as determinações das componentes, por exemplo, realizam-se as seguintes operações (ROWSON et al., 1998):

$$S_{horizontal}^{(s)} = \sqrt{S_1^{2(s)} + S_2^{2(s)}} \quad (21)$$

$$S_{vertical}^{(s)} = S_3^{(s)} + S_1^{(s)} \cdot \tan\theta_{GPA} \quad (22)$$

onde $S_1^{(s)}$, $S_2^{(s)}$ e $S_3^{(s)}$ correspondem aos s-ésimos elementos da primeira, segunda e terceira linhas de S, respectivamente, e θ_{GPA} (*glide path angle*) o ângulo de deslocamento para o caminho de aproximação final, normalmente 3° (SRINIVAS et al., 2014).

Assumindo que os erros de posição horizontal e vertical possuem distribuição gaussiana, os níveis de proteção horizontal (HPL) e vertical (VPL) podem então ser calculados pelas equações (23) e (24), considerando a hipótese H0 (sem falhas) (SRINIVAS et al., 2014; LEE, 2005; WALTER et al., 1997):

$$HPL = K_{ffmd} \cdot \sigma_{\text{Erro Posição Horizontal}} \quad (23)$$

$$VPL = K_{ffmd} \cdot \sigma_{\text{Erro Posição Vertical}} \quad (24)$$

onde K_{ffmd} (*fault-free missed detection*) é o quantil de uma distribuição gaussiana unitária correspondente a α (LEE, 2005). Rowson et al. (1998) ressaltam também que K_{ffmd} trata-se de um multiplicador que representa a probabilidade de detecção de erros na pseudodistância sem falhas, sendo o seu valor dependente do número de estações de referência em operação no sistema GBAS e do tipo de operação de voo. A Tabela 3 apresenta os valores de K_{ffmd} para as aproximações precisas CAT-I, II e III.

Tabela 3: Valores de K_{ffmd} para as aproximações precisas CAT-I, II e III (ROWSON et al., 1998)

Operação de Voo	***Número de Estações de Referência em Operação no GBAS***		
	2	3	4
CAT-I	5,762	5,810	5,847
CAT-II	6,598	6,641	6,673
CAT-III	6,598	6,641	6,673

6. APROXIMAÇÃO NO AEROPORTO SBGL

Utilizando as estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) disponíveis na região do aeroporto internacional Tom Jobim, e considerando 63 dias entre os anos de 2000 e 2016 (abrangendo os ápices dos ciclos solares 23 e 24), um raio de busca de 500 km em relação ao aeroporto e uma distância máxima de 400 km para a formação dos pares de estações, foram estimados, primeiramente, os parâmetros do modelo do CONUS para a região do aeroporto SBGL durante o período do outono, seguindo o procedimento descrito em Pereira et al. (2017).

Tais estimativas consideraram apenas medidas de fase em L1 e L2 dos satélites GPS e uma máscara de elevação de 10°. Os gradientes ionosféricos das 63 datas em função da elevação dos satélites são apresentados na Figura 7, onde CTM representa o limite do *CONUS Threat Model*.

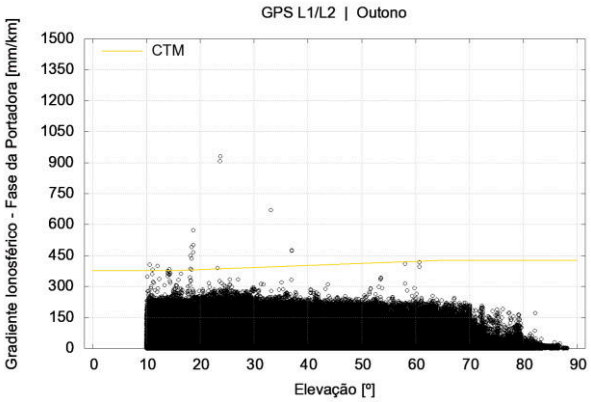


Figura 7: Gradientes ionosféricos em função da elevação dos satélites GPS para o aeroporto SBGL

Analisando a Figura 7 tem-se que durante o outono as estimativas apenas não atende o limite do modelo norte-americano quando a elevação está compreendida entre 10° e 37°, sendo que os gradientes que superaram o limiar são inferiores a 930 mm/km. Assim, o GBAS instalado no aeroporto é apto para ser utilizado exceto quando houver uma grande concentração de satélites na janela supracitada.

Com o intuito de avaliar a janela de restrição estabelecida realizaram-se estimativas de HPL e VPL em tempo real e comparações com os valores de HAL e VAL estabelecidos pela ICAO. Foi analisado o dia 23 de abril de 2018, das 23h12 às 23h48 TU (Tempo Universal).

Para a aproximação no aeroporto SBGL foram utilizados, como exemplo, os dados de latitude, longitude, altitude e velocidade de um voo comercial da TAM/JJ3839 realizado dia 12 de março de 2018, que partiu do aeroporto internacional de Recife/PE (SBRF). Tais dados foram obtidos do *website* FlightAware (https://pt.flightaware.com/). A Figura 8 apresenta a trajetória do voo (em preto) durante os últimos 250 km de voo.

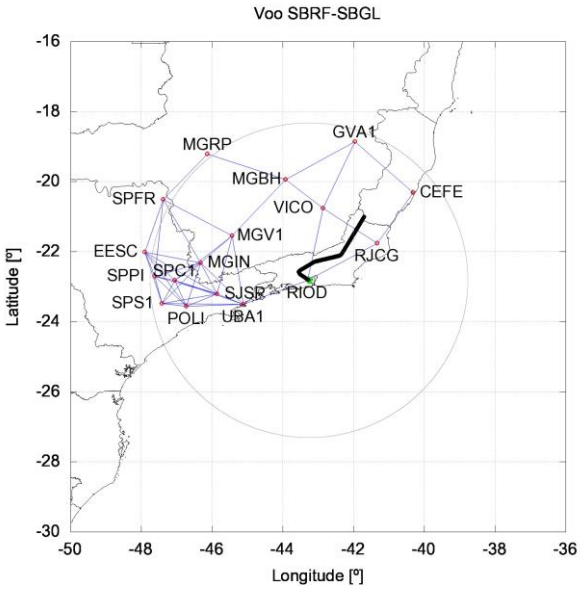


Figura 8: Trajetória dos últimos 250 km do voo TAM/JJ3839 com destino ao aeroporto SBGL

Já a Figura 9 ilustra a variação temporal da aeronave em termos de distância à SBGL, altitude e velocidade dos últimos quilômetros.

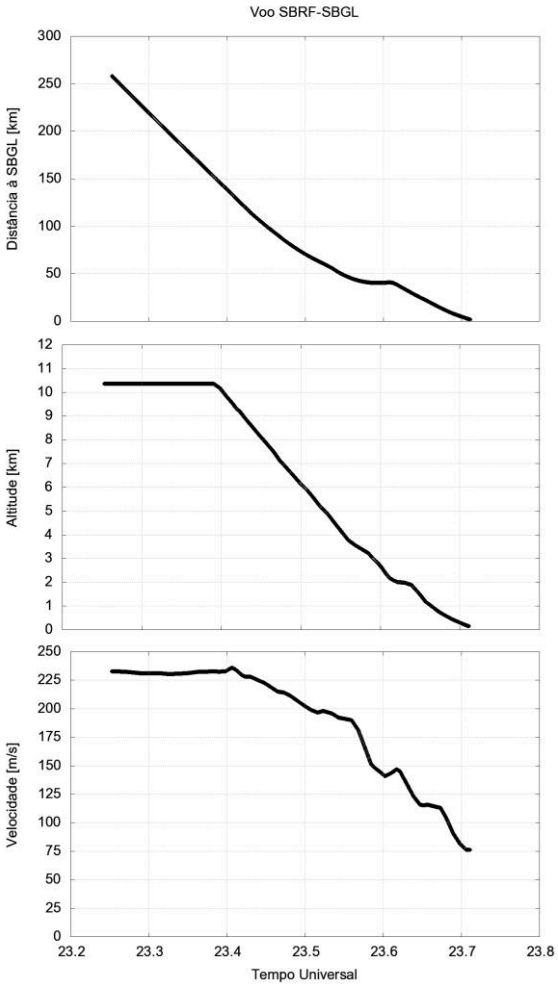


Figura 9: Distância, altitude e velocidade da aeronave durante os últimos 250 km do voo TAM/JJ3839 com destino ao aeroporto SBGL

Nota-se pela Figura 9 que a aeronave inicia o procedimento de aproximação por volta das 23h24 TU, isto é, há 20 minutos ou 150 km de distância do aeroporto, momento em que a altitude e a velocidade começam a ser reduzidas.

Os valores de σ_{vig} para os satélites GPS e GLONASS foram estimados em tempo real a partir do programa MoR_Ion_TR (PEREIRA, 2018), utilizando as estações da RBMC-IP (RBMC em Tempo Real – *Internet Protocol*) compreendidas em um raio de 500 km em relação à localização do aeroporto, e considerando uma distância máxima de 250 km entre as estações para a formação dos pares, conforme apresentado na Figura 8. Tais valores de desvios-padrões foram obtidos tanto para blocos de distâncias de 50 em 50 km, quanto independentemente da distância (denominado de geral), ou seja, considerando todos os pares de estações de 0 a 250 km.

O cálculo da variância da pseudodistância de cada satélite visível ($\sigma^{2}_{PD}{}^{(s)}$), dada pela equação (10), foi realizado utilizando os erros devido à aeronave, à troposfera, à ionosfera e à estação. Destaca-se que para o erro devido a camada troposférica, a incerteza do índice de refratividade e a altura da camada troposférica foram extraídos da mensagem GBAS Tipo 2, sendo iguais a 15 e 12.900 m, respectivamente. Em relação ao erro devido à ionosfera considerou-se para o raio médio da Terra o valor de 6.371 km, 350 km para a altura da camada ionosférica, a distância inclinada entre a aeronave e a estação GBAS, para cada instante do voo, foi obtida a partir das coordenadas tridimensionais do GBAS e da aeronave, e adotou-se 100 segundos pra a constante do filtro de suavização. Já para a estimativa do erro devido à estação foram obtidos valores considerando 4 estações de referência operantes no sistema GBAS. Tanto para o erro devido à aeronave quanto à estação foram considerados os parâmetros GAD-A e B.

Assim, a partir dos dados do GBAS, da aeronave e do σ_{vig} foi desenvolvido um programa auxiliar denominado SBGL_PL (PEREIRA, 2018) para o cálculo dos níveis de proteção horizontal e vertical, de acordo com a sequência de equações apresentadas na seção 5. Ressalta-se que foi considerado 3° para o ângulo de deslocamento para o caminho de aproximação final e 10° para a máscara de elevação dos satélites.

Foram obtidos valores de HPL e VPL utilizando somente satélites GPS (G), somente satélites GLONASS (R) e combinando as duas constelações (G+R). Além dos níveis de proteção também são apresentados o número de satélites disponíveis para cada constelação.

A Figura 10 apresenta os resultados considerando uma aproximação CAT-I, parâmetros GAD-A e estimativa σ_{vig} em intervalos de distância de 50 km. Os gráficos do lado esquerdo correspondem aos resultados sem o *Screening*, ao passo que do lado direito são os resultados da exclusão dos satélites que apresentaram σ_{vig} superior a 4 mm/km. Ressalta-se que os níveis de proteção são nulos para o bloco 0-50 km devido à inexistência de pares de estações nessa faixa de quilometragem para a estimativa do σ_{vig}. Já a Figura 11 apresenta a elevação dos satélites GPS e GLONASS disponíveis em função do TU, bem como os respectivos *skyplots*.

A partir da Figura 10 verifica-se que os valores de HPL satisfazem plenamente o HAL de 40 m para CAT-I. Em relação ao nível vertical nota-se que, com exceção do bloco 100-150 km e de alguns instantes para os satélites norte-americanos, os demais valores atendem o limiar de 12 m estabelecido pela ICAO.

O não atendimento do VPL durante o bloco 100-150 km está intrinsicamente relacionado com número de satélites disponíveis, cinco (mínimo necessário para ter um grau de liberdade), e o não atendimento do nível de proteção vertical dos satélites GPS durante os blocos 150-200 km e 200-250 km se deve a concentração de satélites com elevações entre 10° e 37°, janela de restrição imposta pelo modelo de risco. A partir da Figura 11 checa-se que a partir do instante 23h27 TU a maioria dos satélites situam-se fora do intervalo de restrição, acarretando no atendimento dos valores de VPL em relação a VAL.

Fato interessante a destacar é a utilização conjunta dos satélites GPS e GLONASS, que melhoram consideravelmente os valores de proteção. Isso é devido ao aumento de redundância de satélites, ou seja,

do grau de liberdade, que tende a sobrepor a degradação dos sinais que poucos satélites podem sofrer pelas frentes ionosféricas.

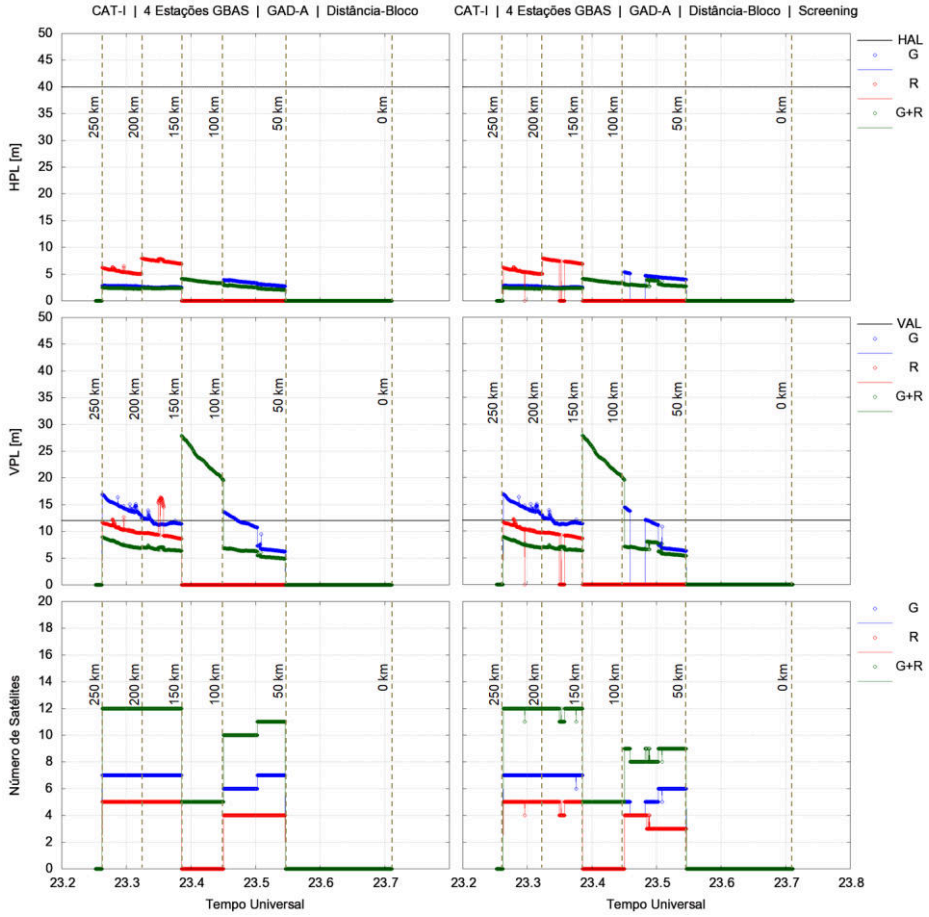


Figura 10: HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-I no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de 50 km (bloco) e *Screening*

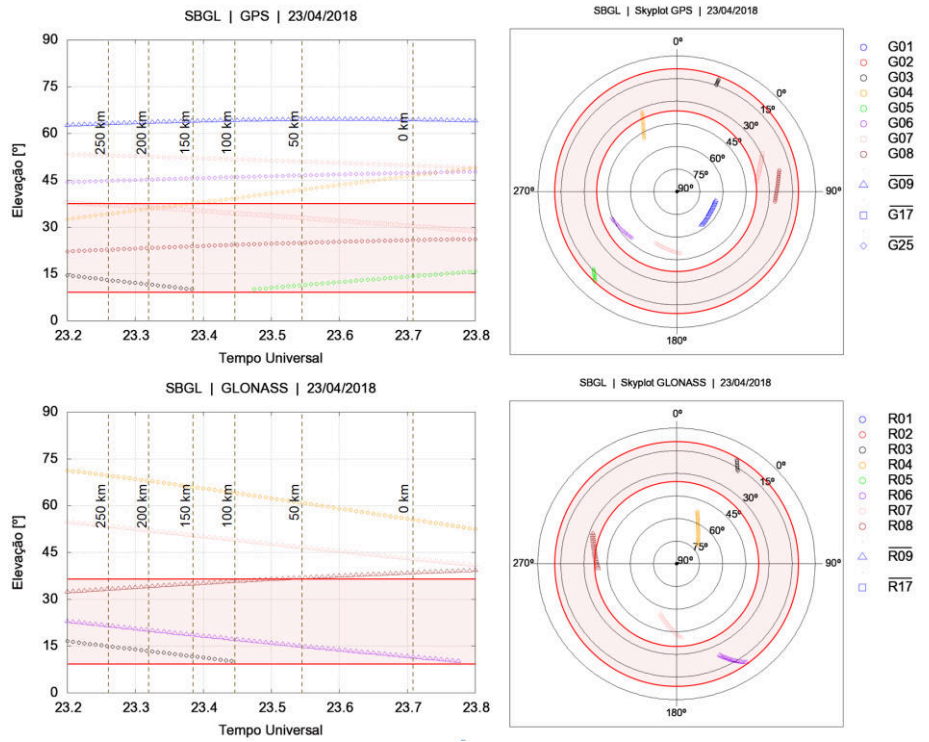


Figura 11: Elevação e *skyplot* dos satélites GPS e GLONASS disponíveis para a aproximação no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018

Verifica-se também pela Figura 10 que a estimativa do σ_{vig} em blocos de distâncias de 50 km traduz com mais realidade a variabilidade do comportamento da camada ionosférica, ao contrário de um único valor para região circundante do aeroporto que, por sua vez, implica em comportamento mais moderado dos níveis de proteção.

A respeito da técnica *Screening* tem-se que deve ser utilizada apenas quando há um número elevado de satélites disponíveis, pois, caso contrário, a exclusão excessiva de satélites superiores ao limiar de 4 mm/km do *CONUS Threat Model* proporciona uma piora da geometria espacial, degradando assim a estimativa dos níveis de proteção, conforme pode ser notado para o caso dos satélites GLONASS às 23h30 TU, que após a exclusão restaram apenas 3 satélites disponíveis, impossibilitando a estimativa de VPL e HPL. Em contrapartida, utilizando as duas constelações em concomitância observa-se que, após o *Screening*, no mínimo 5 satélites estão disponíveis, o que reflete na estimativa do VPL em especial, atendendo praticamente o limiar de CAT-I.

Na situação de se utilizar os parâmetros GAD-B para a aproximação do tipo CAT-III, obtêm-se os níveis apresentados na Figura 12.

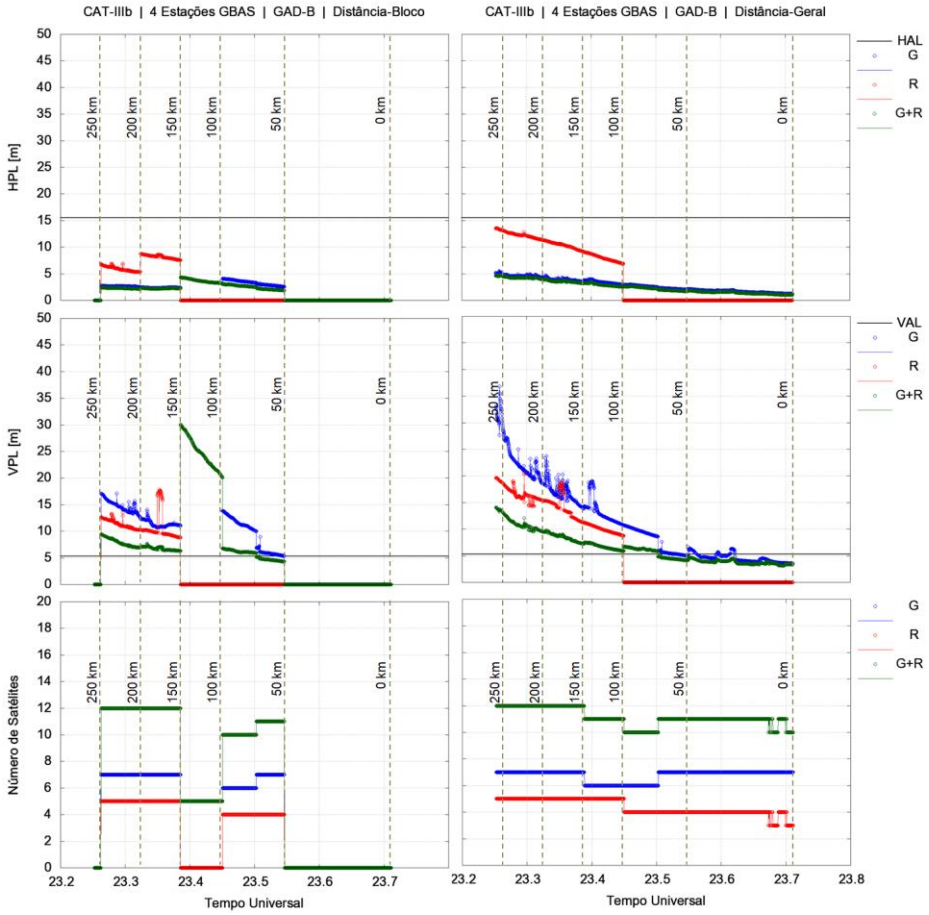


Figura 12: HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-III no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-B, determinação do σ_{vig} por intervalos de 50 km (bloco) e sem distinção de distância (geral)

Conforme mostrado na Figura 12, verifica-se que pelo menos nos últimos 75 km de distância os valores de VPL, para a combinação de satélites GPS e GLONASS, satisfazem o valor de VAL (5,3 m), e que nos últimos 50 km o uso somente dos satélites GPS também atende o limiar. Tais resultados indicam que o uso combinado das constelações é uma alternativa para se realizar aproximação e pouso preciso CAT-III no aeroporto internacional do Rio de Janeiro.

7. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos de HPL e VPL verificou-se que é possível realizar um

procedimento de pouso preciso de categoria CAT-I (VAL de 12 m e HAL de 40 m) com GAD-A e quatro estações GBAS operantes, durante o outono no aeroporto SBGL, desde que sejam respeitadas as restrições estabelecidas (evitar satélites com elevações compreendidas entre 10° e 37°).

Pôde-se concluir que a técnica *Screening* deve ser utilizada apenas quando há um número elevado de satélites disponíveis, pois, caso contrário, a exclusão excessiva de satélites superiores ao limiar de 4 mm/km do *CONUS Threat Model* proporciona uma piora da geometria espacial, degradando assim a estimativa dos níveis de proteção.

Em contrapartida, constatou-se que o uso combinado de satélites GPS e GLONASS melhora consideravelmente os valores de proteção, pois o aumento da redundância de satélites tende a sobrepor a degradação dos sinais que poucos satélites podem sofrer pelas frentes ionosféricas. Fato esse é corroborado pelo experimento que permitiu realizar um procedimento CAT-III (VAL de 5,3 m e HAL de 15,5 m) com GAD-B e quatro estações operantes, utilizando satélites GPS e GLONASS em concomitância.

Foi analisado também que a estimativa do σ_{vig} em blocos de distâncias de 50 km traduz com mais realidade a variabilidade do comportamento da camada ionosférica, ao contrário de um único valor para região circundante do aeroporto que, por sua vez, implica em comportamento mais moderado dos níveis de proteção.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à FAPESP pela bolsa de doutorado (proc. n° 2015/20522-7), ao INCT GNSS-NavAer (CNPq – proc. n° 465648/2014-2, FAPESP – proc. n° 2017/50115-0 e CAPES – proc. n° 88887.137186/2017-00) pelo ambiente à pesquisa e às bolsas PQ (CNPq – proc. n° 309832/2016-0 e n° 307417/2017-4).

REFERÊNCIAS

BUMRUNGKIT, A.; RUNGRAENGWAJIAKE, S.; SUPNITHI, P.; SIANSAWASDI, N. Drift velocity estimation of ionospheric disturbance using GPS observations. In: THE 4th JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY, ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING, 2014, Chiang Rai. *Electronic proceedings…*Chiang Rai, 5-8 mar. 2014. doi: 10.1109/JICTEE.2014.6804061

CIRCIU, M. S.; FELUX, M.; REMI, P.; YI, L.; BELABBAS, B. PULLEN, S. Evaluation of dual frequency GBAS performance using flight data. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL TECHNICAL MEETINGS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2014. *Electronic proceedings…* ITM2014, 2014.

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.

ENE, A.; QIU, D.; LUO, M.; PULLEN, S.; ENGE, P. Comprehensive ionosphere storm data analysis method to support LAAS threat model development. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2005, San Diego. *Electronic proceedings…*San Diego, Jan. 2005. p. 110-130.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. New York: Springer-Verlag Wien, 2008. 516 p.

ICAO. International Civil Aviation Organization. *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I, Amendment 88 – Radio Navigation Aids*. 2013a. Disponível em: <http://aaians.org/sites/default/files/CNS%20 Documents/ICAO%20 Amedment%2088%20to%20Annex% 2010.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2016.

ICAO. International Civil Aviation Organization. *Global Navigation Satellite System (Gnss) Manual 2nd Edition (Doc 9849).* 2013b. Disponível em: <http://www.icao.int/airnavigation/Lists/T_Documents/DispForm.aspx?ID=63>. Acesso em: 15 dez. 2016.

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, J.; LEE, S. W.; LEE, H. K. An annual variation analysis of the ionospheric spatial gradient over a regional area for GNSS applications. *Advances in Space Research*, v. 54, p. 333-341, 2014.

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

KOLB, P. F.; CHEN, X.; VOLLATH, U. A new method to model the ionosphere across local area networks. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2005, Alexandria. *Proceedings...* Alexandria: [s.n.], 2005. p. 705-711.

LEE, J. *GPS-Based aircraft landing systems with enhanced performance: beyond accuracy*. 2005. 146 p. Dissertation (PhD in Philosophy) – Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, USA.

LEE, J.; DATTA-BARUA, S.; ZHANG, G.; PULLEN, S.; ENGE, P. Observations of low-elevation ionospheric anomalies for Ground-Based Augmentation of GNSS. *Radio Science*, v. 46, RS6005, 2011a. doi:10.1029/2011RS004776

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, 2011b. doi:10.2514/1.C031309

LUO, M.; PULLEN, S.; DATTA-BARUA, S.; ZHANG, G.; WALTER, T.; ENGE, P. LAAS study of slow-moving ionosphere anomalies and their potential impacts. In: 18th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2005, Long Beach. *Electronic proceedings…* Long Beach: ION/GNSS, Sep. 2005. p. 2337-2349.

LUO, M.; PULLEN, S.; DENNIS, J.; KONNO, H.; XIE, G.; WALTER, T.; ENGE, P.; DATTA-BARUA, S.; DEHEL, T. LAAS ionosphere spatial gradient threat model and impact of LGF and airborne monitoring. In: ION GPS/GNSS, 2003, Portland. *Electronic proceedinds…*Portland: ION/GNSS, Sep. 2003. p. 2255-2274.

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.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Ed. da UNESP, 2008. 476 p.

PEREIRA, V. A. S. *Avaliação e usabilidade do modelo CONUS de risco ionosférico para GBAS no Brasil*. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente (em andamento).

PEREIRA, V. A. S.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. Procedimento geral para o desenvolvimento de modelo de risco ionosférico para GBAS e principais modelos existentes. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA & II JORNADAS LUSÓFONAS – CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 2017, Presidente Prudente. *Anais eletrônicos...* Presidente Prudente: Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, 24-26 jul. 2017. p. 563-570.

PULLEN, S.; PARK, Y. S.; ENGE, P. Impact and mitigation of ionospheric anomalies on Ground-Based Augmentation of GNSS. *Radio Science*, v. 44, RS0A21, 2009. doi:10.1029/2008RS004084

ROWSON, S.; DYKE, K. V.; KLINE, P.; MURPHY, T.; HUA, Q. Evaluation of LAAS Availability with an enhanced GPS constellation. In: POSITION LOCATION AND NAVIGATION SYMPOSIUM IEEE, 1998. *Electronic proceedings…* 1998. p. 501-509.

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 LAAS. *Progress In Electromagnetics Research B*, v. 57, p.191-205, 2014.

TANG, H.; WALTER, T.; BLANCH, J.; ENGE, P.; CHAIN, F. C. Flight test data validation of dual-frequency GPS measurement error characteristics. In: ION/GNSS, 2009, Savannah. *Electronic proceedings…*Savannah: ION/GNSS, 2009. p. 1637-1644.

WALTER, T.; ENGE, P.; HANSEN, A. J. A proposed integrity equation for WAAS MOPS. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997. *Proceedings…* ION/GPS, Sep. 1997.

WANG, Z.; MACABIAU, C.; ZHANG, J.; ESCHER, A. C. Prediction and analysis of GBAS integrity monitoring availability at LinZhi Airport. *GPS Solutions*, v. 18, p. 27-40, 2014. doi:10.1007/s10291-012-0306-4

YOON, M.; LEE, J. Medium-scale travelling ionospheric disturbances in the Korean Region on 10 November 2004: potential impact on GPS-Based Navigation Systems. *Space Weather*, v. 12, p. 173–186, 2014. doi:10.1002/2013SW001002