



Desempenho de Combinações Ion-Free e GRAPHIC no PPP Multi-GNSS sob Diferentes Condições Ionosféricas no Brasil

Performance of Ionosphere-Free and GRAPHIC Combinations in Multi-GNSS PPP under Different Ionospheric Conditions in Brazil

João Pedro Voltare Zaupa¹, Daniele Barroca Marra Alves² e Paulo de Tarso Setti Junior³

¹ Universidade Estadual Paulista (UNESP), Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), Presidente Prudente, Brasil. jp.zaupa@unesp.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1123-7578>.

² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. daniele.barroca@unesp.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9033-8499>.

³ Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. p.setti@unesp.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5080-1832>.

Recebido: 02.2026 | Aceito: 07.2026

Resumo: Este artigo avalia, de forma preliminar, o desempenho do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) multi-GNSS com os métodos *Group and Phase Ionospheric Calibration* (GRAPHIC) e combinações *ion-free* de dupla (IF2) e tripla frequência (IF3), considerando condições ionosféricas contrastantes no Brasil. Foram processados dados RINEX3 de cinco estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) para março e junho de 2024, totalizando 60 dias de observações, com sessões diárias de três horas iniciadas às 0h UTC. A avaliação considerou a disponibilidade de satélites, a geometria da solução por meio da diluição de precisão posicional (*position dilution of precision* - PDOP), o tempo de convergência, as discrepâncias posicionais no Sistema Geodésico Local e os resíduos de pseudodistância e fase em função do ângulo de elevação. Os resultados mostram que a IF2 manteve o melhor desempenho geral, preservando maior disponibilidade multi-constelação, com cerca de 28 satélites por época e PDOP próximo de 1, além de apresentar convergência mais rápida e menores discrepâncias finais, especialmente em junho. O GRAPHIC apresentou maior dispersão, associada à propagação do ruído da pseudodistância na observável *quasi-carrier*. A IF3, por sua vez, foi penalizada pela menor disponibilidade efetiva de observações simultâneas em três frequências, com redução para aproximadamente 12 satélites por época e aumento do PDOP, resultando em maior tempo de convergência e erros residuais mais elevados, sobretudo na componente vertical. Os resultados indicam que a aplicação direta da tripla frequência, nas condições de rastreamento das estações analisadas, não garantiu melhoria sistemática em relação à IF2. Assim, sua adoção operacional requer disponibilidade multifrequência adequada, controle de qualidade e modelagem explícita de vieses interfrequência.

Palavras-chave: PPP. Multi-GNSS. Combinação livre da ionosfera. GRAPHIC. Ionosfera.

Abstract: This paper preliminarily evaluates the performance of multi-GNSS Precise Point Positioning (PPP) using the GRAPHIC method and dual- (IF2) and triple-frequency (IF3) ionosphere-free combinations under contrasting ionospheric conditions in Brazil. RINEX3 data from five stations of the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems (RBMC) were processed for March and June 2024, totaling 60 days of observations, with daily three-hour sessions starting at 00:00 UTC. The assessment considered satellite availability, solution geometry through position dilution of precision (PDOP), convergence time, positioning discrepancies in the Local Geodetic System, and pseudorange and carrier-phase residuals as a function of elevation angle. The results show that IF2 achieved the best overall performance, preserving greater multi-constellation availability, with approximately 28 satellites per epoch and PDOP close to 1, while also providing faster convergence and smaller final discrepancies, especially in June. GRAPHIC showed greater dispersion, associated with the propagation of pseudorange noise into the quasi-carrier observable. IF3, in turn, was penalized by the lower effective availability of simultaneous triple-frequency observations, decreasing to approximately 12 satellites per epoch and increasing PDOP, which resulted in longer convergence times and larger residual errors, especially in the vertical component. The results indicate that the direct application of triple-frequency combinations, under the tracking conditions of the analyzed stations, did not provide systematic improvement over IF2. Therefore, its operational adoption requires adequate multifrequency availability, quality control, and explicit modeling of inter-frequency biases.

Keywords: PPP. Multi-GNSS. Ionosphere-free combination. GRAPHIC. Ionosphere.

1 INTRODUÇÃO

A modernização contínua das constelações *Global Navigation Satellite System* (GNSS) tem ampliado o alcance de técnicas de posicionamento de alta precisão, incluindo o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Nesse método, a determinação de coordenadas geodésicas com acurácia a nível centimétrico pode ser obtida a partir de um único receptor, desde que as observações de pseudodistância e fase da portadora sejam processadas em conjunto com produtos precisos de órbita e relógio, além de modelos/correções atmosféricas adequados (Ge et al., 2019; Elsheikh et al., 2023). Esse cenário tem sido favorecido, em especial, pela consolidação de serviços globais que estimam, rotineiramente, produtos precisos e pela adoção crescente de soluções multi-GNSS em aplicações científicas e de engenharia (Elsheikh et al., 2023). Destaca-se, nesse contexto, o projeto *International GNSS Service (IGS) Multi-GNSS Experiment* (MGEX), responsável pela geração e disponibilização de produtos precisos multi-GNSS, incluindo órbitas (SP3), relógios (CLK) e vieses associados (*Observable Specific Bias* – OSB), possibilitando a integração consistente de diferentes constelações no processamento PPP (Montenbruck et al., 2017).

Historicamente, o PPP foi difundido sobretudo com a combinação linear livre de ionosfera (*ion-free*) de dupla frequência, por ser uma forma direta de eliminar o termo ionosférico de primeira ordem, uma das principais fontes de erro das observações GNSS (Tegedor e Øvstedal, 2014). Essa abordagem permanece como padrão em aplicações operacionais, em parte devido à consistência com os produtos utilizados no processamento, o que ajuda a explicar por que serviços clássicos ainda se baseiam majoritariamente em duas portadoras. Entretanto, a disponibilização de sinais adicionais nas constelações modernas, como L5 (GPS), E5a/E5b e E6 (Galileo), B2a/B2b (BeiDou) e L3 (GLONASS-K), viabilizou o uso de combinações *ion-free* de tripla frequência (Su e Jin, 2019; Wang et al., 2022). Em princípio, essa expansão abre espaço para combinações com propriedades estocásticas distintas e maior tolerância a condições adversas de observação; contudo, tais combinações também podem implicar maior amplificação de ruído e alterações no comportamento das ambiguidades, o que nem sempre se traduz em melhoria efetiva de desempenho quando comparado ao modelo tradicional de dupla frequência (Su et al., 2020; Tian et al., 2026). Paralelamente, estratégias alternativas como o método *Group and Phase Ionospheric Calibration* (GRAPHIC) têm sido empregadas, especialmente em receptores de frequência única, permitindo a mitigação do efeito ionosférico de primeira ordem por meio da combinação entre pseudodistância e fase da portadora, ainda que com penalização em termos de ruído (Choy, 2009; Shi et al., 2012). A literatura também evidencia que o desempenho do PPP é sensível às condições ionosféricas, sobretudo em baixas latitudes, onde a variabilidade do *Total Electron Content* (TEC) pode se intensificar e apresentar dinâmica mais complexa (Su et al., 2020; Elsheikh et al., 2023; Glaner e Weber, 2023). Em períodos de alta atividade ionosférica (associados, por exemplo, a tempestades geomagnéticas, cintilação e irregularidades como bolhas ionosféricas) as flutuações do meio propagativo degradam a qualidade das observações, elevam resíduos e podem prolongar o período para a convergência da solução (Moraes et al., 2014; Veetil et al., 2020).

Embora estudos recentes apontem benefícios associados ao uso de observações multifrequência no PPP, tais como redução do tempo de convergência, maior redundância observacional e melhor suporte à estimação das ambiguidades, esses ganhos dependem da disponibilidade efetiva dos sinais, da consistência dos produtos precisos utilizados, da modelagem de vieses interfrequência e das condições ionosféricas locais. Trabalhos como Deo e El-Mowafy (2017) e Su et al. (2020) demonstram melhorias no desempenho com o uso de múltiplas frequências, enquanto investigações mais recentes destacam a importância da modelagem de vieses interfrequência e da integração multifrequência em soluções PPP multi-GNSS (Wang et al., 2022; Wu et al., 2022; Yang et al., 2024). No entanto, a aplicação operacional dessas estratégias pode ser limitada pela heterogeneidade dos receptores, pelo suporte incompleto a determinados sinais e por restrições de firmware ou canais de rastreamento, como observado para o BeiDou-3 em redes multi-GNSS internacionais (Zajdel et al., 2022). Além disso, em regiões de baixa latitude, como o Brasil, a Anomalia de Ionização Equatorial e a cintilação ionosférica introduzem irregularidades espaciais e temporais significativas no TEC, podendo degradar a qualidade das observáveis, reduzir a continuidade do rastreo e comprometer a disponibilidade simultânea de múltiplas frequências. Estudos recentes também têm evidenciado o impacto da cintilação na disponibilidade GNSS e no posicionamento preciso em regiões equatoriais, reforçando a necessidade de

avaliações específicas sob essas condições (Aguiar et al., 2025; Marques et al., 2025).

Diante disso, este artigo objetiva avaliar o desempenho de combinações lineares *ion-free* de dupla e tripla frequência, e do GRAPHIC no PPP multi-GNSS, integrando observações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, em situações de baixa e alta variabilidade ionosférica. Para tanto, são analisados dados coletados por estações brasileiras localizadas em região de baixa latitude, contemplando períodos distintos de atividade ionosférica. As métricas de avaliação incluem: (1) acurácia posicional, considerando o vetor de discrepância e a propagação da matriz de covariância dos parâmetros posicionais ajustados; (2) resíduos das observações, avaliados separadamente para pseudodistância e fase da portadora; e (3) tempo de convergência, definido como o intervalo necessário para atingir limiares predefinidos de precisão horizontal (H) e vertical (V). Ademais, este artigo corresponde a uma versão estendida do trabalho apresentado por Zaupa et al. (2025) no I CIRF & VIII SIMGEO – Regularização Fundiária Plena & Geotecnologias.

Além desta introdução, o artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os fundamentos das combinações GRAPHIC e *ion-free*, e sua aplicação no PPP; a Seção 3 descreve materiais e métodos, incluindo dados, estratégias de processamento e critérios de avaliação; a Seção 4 discute os resultados, comparando o desempenho das combinações sob diferentes condições ionosféricas; por fim, são apresentadas na Seção 5 as conclusões, sintetizando os principais achados e suas implicações para o posicionamento GNSS de alta precisão.

2 COMBINAÇÃO LINEAR LIVRE DA IONOSFERA

A propagação dos sinais GNSS pela atmosfera terrestre é fortemente influenciada pela ionosfera, sobretudo em regiões próximas ao equador magnético, onde são observados gradientes espaciais e temporais intensos da densidade eletrônica. Por se tratar de um meio dispersivo, a ionosfera afeta de forma distinta a propagação do grupo e da fase dos sinais GNSS. A interação com os elétrons livres reduz a velocidade de grupo, causando atraso nas pseudodistâncias, enquanto a velocidade de fase se torna superior à da luz no vácuo, resultando em avanço nas observações de fase da portadora. Ambos os efeitos dependem da frequência do sinal e do TEC ao longo da linha de visada satélite–receptor (Jiang et al., 2024). A maior parcela desse efeito está associada à região F, especialmente à subcamada F2, cujo pico de densidade eletrônica ocorre tipicamente entre 250 e 400 km de altitude, podendo atingir valores da ordem de 10^5 a 10^6 elétrons por centímetro cúbico (Hobiger & Jakowski, 2017; Sousasantos et al., 2024). As variações do TEC relacionam-se a fatores como latitude, hora local, estação do ano e atividade solar e magnética, podendo ocasionar efeitos severos, como cintilação, bolhas ionosféricas e perdas de ciclo (Matsuoka et al., 2013; Veetil et al., 2020; Zaupa et al., 2022; Dal Poz et al., 2025; Yang & Morton, 2025; Zaupa et al., 2026b). Diferentes estratégias podem ser empregadas para mitigar os efeitos ionosféricos nas observações GNSS. Entre elas, destacam-se o método GRAPHIC (Seção 2.1), baseado na combinação entre pseudodistância e fase da portadora, e as combinações lineares *ion-free*, que exploram a dependência do atraso ionosférico com o inverso do quadrado da frequência do sinal. Essa técnica baseia-se na combinação de duas ou mais observações realizadas simultaneamente em diferentes frequências. Nas Seções 2.2 e 2.3 são apresentadas as combinações *ion-free* de dupla e tripla frequência, respectivamente. A Seção 2.4 discute a amplificação do ruído causada por essa combinação linear.

2.1 Método GRAPHIC

O GRAPHIC constitui uma estratégia de mitigação ionosférica voltada principalmente a aplicações com receptores de frequência única, sendo fundamentado no conceito de “*quasi-carrier*” (Choy, 2009). Nesse método, as observáveis de pseudodistância são utilizadas conforme disponibilizadas em arquivos RINEX, podendo ser previamente corrigidas por modelos ionosféricos, como o modelo de Klobuchar (1987). A principal característica do método reside na combinação entre as observáveis de pseudodistância (P) e fase da portadora (L), explorando o fato de que os efeitos ionosféricos de primeira ordem atuam com a mesma magnitude sobre essas observações, porém em sentidos opostos. Dessa forma, ao combinar essas grandezas, é possível eliminar esse efeito de maneira direta. Considerando todas as observações expressas em metros, a observável resultante, denominada *quasi-carrier* ($\bar{\varphi}$), pode ser expressa como (Choy, 2009):

$$\bar{\varphi} = \frac{P + L}{2}. \quad (1)$$

Dessa forma, a combinação resulta em um aumento do ruído efetivo da observação, o que pode impactar negativamente a precisão da solução, especialmente em aplicações de alta acurácia. Apesar dessa limitação, o método apresenta vantagens relevantes em cenários com restrição de frequências disponíveis, constituindo uma alternativa viável para aplicações baseadas em receptores de baixo custo.

2.2 Combinação linear de dupla frequência (IF2)

As combinações *ion-free* podem ser aplicadas tanto para as observáveis de pseudodistância quanto para as de fase da portadora. Para sinais 1 e 2 com frequências f_1 e f_2 , respectivamente, os coeficientes multiplicadores m_1 e m_2 são definidos por (Hauschild, 2017):

$$m_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, m_2 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2)$$

resultando nas seguintes expressões para as combinações para pseudodistância (P_{if}) e fase da onda portadora (L_{if}):

$$\begin{aligned} P_{if} &= m_1 P_1 - m_2 P_2, \\ L_{if} &= m_1 L_1 - m_2 L_2, \end{aligned} \quad (3)$$

sendo P_1 e L_1 , P_2 e L_2 as observações de pseudodistância e fase para os sinais 1 e 2 respectivamente. A utilização dessas combinações é amplamente difundida no PPP, principalmente devido à sua simplicidade de implementação e à eliminação efetiva dos atrasos ionosféricos de primeira ordem. Em geral, observa-se que as combinações envolvendo frequências mais espaçadas (como L1 e L5 GPS) produzem menor ruído combinado. Já combinações entre frequências próximas (E5a/E5b Galileo, por exemplo) resultam em alta amplificação de ruídos, o que pode limitar seu uso prático (Schönemann, 2014).

2.3 Combinação linear de tripla frequência (IF3)

Esta seção apresenta um modelo de PPP baseado em uma combinação linear *ion-free* de tripla frequência, formulada para reduzir a propagação do ruído e, ao mesmo tempo, preservar a geometria, com o objetivo de favorecer uma convergência mais rápida das ambiguidades quando comparada ao modelo tradicional de dupla frequência (Deo e El-Mowafy, 2017). A combinação linear é aplicada de forma consistente tanto às observações de fase da portadora quanto às de pseudodistância. A condição de preservação da geometria é definida pela soma dos coeficientes de combinação igual a 1, enquanto a condição de eliminação do efeito ionosférico de primeira ordem é representada por uma relação entre esses coeficientes e os multiplicadores de frequência associados às constelações (Tabela 1).

Tabela 1 – Multiplicadores de frequência fundamental (10,23 MHz) das constelações GNSS.

Sistema	Sinais e Multiplicadores da Frequência Fundamental		
GPS	L1: 154	L2: 120	L5: 115
GLONASS-K2	G1: 156,5	G2: 122	G3: 117,5
Galileo	E1: 154	E5a: 115	E5b: 118
BeiDou	B1: 152,6	B3: 124	B2: 118

Fonte: Adaptado de Teunissen e Montenbruck (2017).

A minimização da propagação de ruído é alcançada ao minimizar um fator de amplificação de ruído, que é derivado das três frequências. Considerando três sinais de fase ou código observados nas frequências f_1 , f_2 e f_3 , a combinação linear pode ser expressa como (Deo e El-Mowafy, 2017; Su et al., 2020):

$$P_{if} = \alpha P_1 + \beta P_2 + \gamma P_3, \quad (4)$$

$$L_{if} = \alpha L1 + \beta L2 + \gamma L3,$$

em que α , β e γ são os coeficientes da combinação linear. Três condições são impostas para a construção de uma combinação otimizada:

1. Preservação da geometria: a soma dos coeficientes deve ser igual a 1: $\alpha + \beta + \gamma = 1$;
2. Eliminação do efeito ionosférico de primeira ordem: baseada na dependência inversamente proporcional ao quadrado da frequência: $\alpha f1^{-2} + \beta f2^{-2} + \gamma f3^{-2} = 0$;
3. Mínima propagação de ruído: assumindo ruído equivalente nas três observações, o fator de amplificação de ruído ε é definido por: $\varepsilon = \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2$.

Minimizando ε , obtém-se uma combinação mais estável e adequada à estimação das ambiguidades, contribuindo para a redução do tempo de convergência do PPP. A obtenção dos coeficientes pode ser realizada por meio da substituição sequencial nas equações descritas, resultando em uma equação quadrática do tipo:

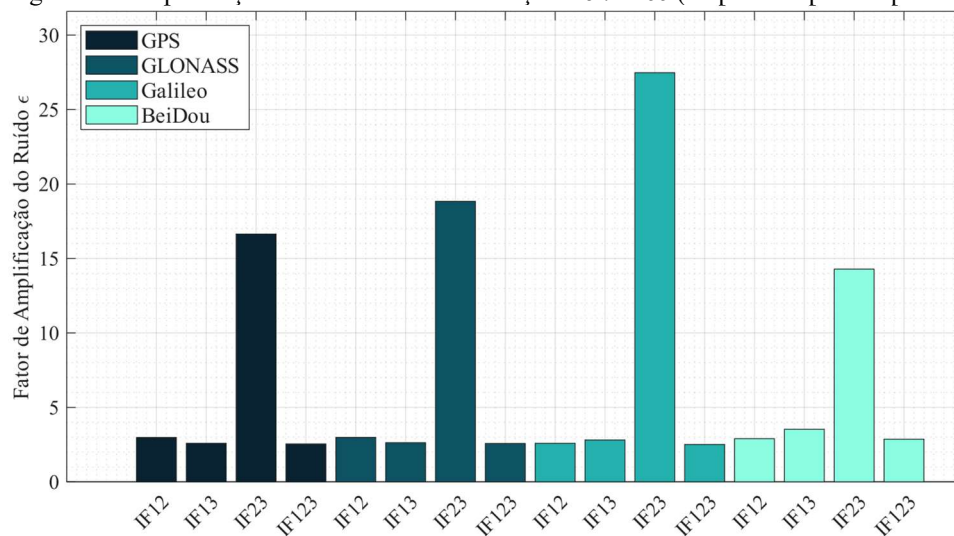
$$A\gamma^2 + B\gamma + C = 0, \quad (5)$$

em que os coeficientes A, B e C dependem dos multiplicadores de frequência, dados na Tabela 1.

2.4 Amplificação do ruído na combinação linear

Embora eficazes na eliminação do termo ionosférico de primeira ordem, as combinações *ion-free* acarretam, inevitavelmente, a amplificação do ruído nas observações resultantes, em função dos pesos atribuídos às diferentes frequências. Essa amplificação pode ser representada por um fator característico para cada conjunto de frequências utilizado e está diretamente relacionada à separação relativa entre elas. É importante ressaltar que esse incremento não se limita à simples propagação das covariâncias das observações originais: inclui também a contribuição do multicaminho, que se manifesta de maneira distinta em cada frequência e, ao ser combinado, pode intensificar ainda mais o ruído efetivo nas observações *ion-free*. A Figura 1 apresenta os valores de ε para diferentes combinações duplas e triplas de sinais GNSS, considerando os sinais mais empregados em cada sistema, organizados como sinais 1, 2 e 3, respectivamente. Adotou-se a seguinte correspondência: L1, L2 e L5 para o GPS; G1, G2 e G3 para o GLONASS (CDMA); E1, E5a e E5b para o Galileo; e B1, B3I e B2I para o BeiDou. Cada combinação representa o par ou o trio de sinais empregado na formação *ion-free*, evidenciando como a seleção das frequências influencia o nível de amplificação de ruído associado.

Figura 1 – Amplificação do Ruído nas Combinações *Ion-Free* (Dupla e Tripla Frequência).



Elaboração: Os Autores (2026).

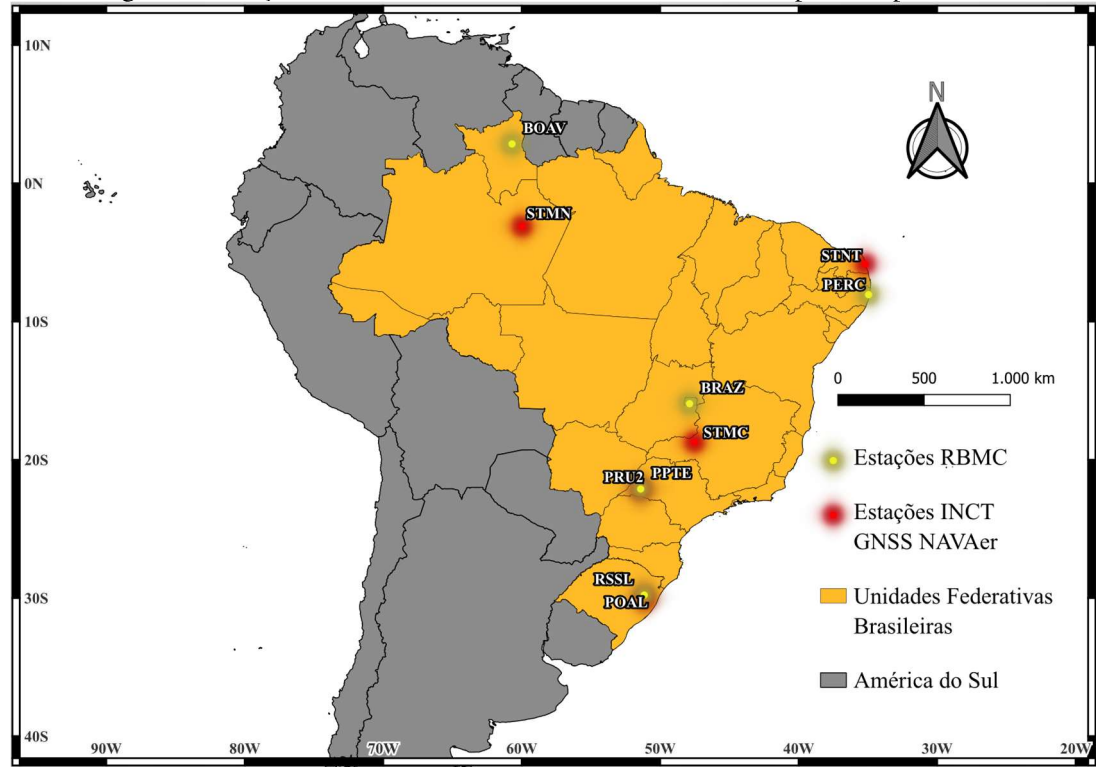
Combinações com frequências próximas, como L2-L5 no GPS ou E5a-E5b no Galileo, tendem a apresentar amplificação significativa, o que se traduz em maior dispersão dos resíduos, menor confiabilidade

nas ambiguidades estimadas e maior tempo de convergência da solução PPP (Schönemann, 2014; Tegedor & Øvstedal, 2014; Deo & El-Mowafy, 2017). Assim, a escolha da combinação mais adequada deve considerar o equilíbrio entre a remoção do efeito ionosférico e a penalidade introduzida pela amplificação do ruído.

3 METODOLOGIA

Neste estudo, foram utilizados dados GNSS de cinco estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), espalhadas pelo país (BOAV, BRAZ, PERC, PPTE, RSSL) (Figura 2). Para a análise da cintilação ionosférica, foram empregados dados oriundos de estações pertencentes ao Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia – Tecnologia GNSS no suporte à navegação aérea (INCT GNSS-NavAer) (POAL, PRU2, STMC, STMN, STNT) (Monico et al., 2022). Os dados foram obtidos no formato RINEX3, com registros contínuos durante dois períodos distintos de 30 dias: março e junho de 2024, totalizando 60 dias de observações. Para cada mês, foi processado um intervalo de 3 horas por dia, com início às 0h UTC. Esses períodos foram selecionados com o intuito de representar condições ionosféricas distintas: março como típico de transição equinocial e junho como representativo do inverno no hemisfério sul. O processamento das observações GNSS foi realizado utilizando abordagens de PPP multi-GNSS, no modo estático, empregando combinações GRAPHIC, IF2 e IF3, com uso do software APPPOLO (*Advanced Precise Point Positioning software for Optimized Localizaton*) (Zaupa, 2025; Zaupa et al., 2026a). Cada configuração foi aplicada de forma independente aos dados dos 60 dias, mantendo-se fixos os demais parâmetros de modelagem e ajuste, como descrito na Tabela 2.

Figura 2 – Estações RBMC e INCT GNSS NavAer selecionadas para o experimento.



Elaboração: Os Autores (2026).

Tabela 2 – Estratégias para o processamento do PPP pelo software APPPOLO.

Parâmetro	Estratégia
Observáveis	GPS: L1 C/A, L2 P(Y), L5; GLONASS: G1, G2, G3; Galileo: E1, E5a, E5b; BeiDou: B1, B2I, B3I.
Incertezas	$\sigma_{p1}=0,8$ m; $\sigma_{p2}=\sigma_{p3}=1,0$ m; $\sigma_{L1}=0,008$ m; $\sigma_{L2}=\sigma_{L3}=0,010$ m (ponderadas pelo inverso do seno da elevação).
Estimador	Robust Adaptive Kalman Filtering (Zhang et al., 2021).

Continua

Tabela 2 – Estratégias para o processamento do PPP pelo software APPPOLO.

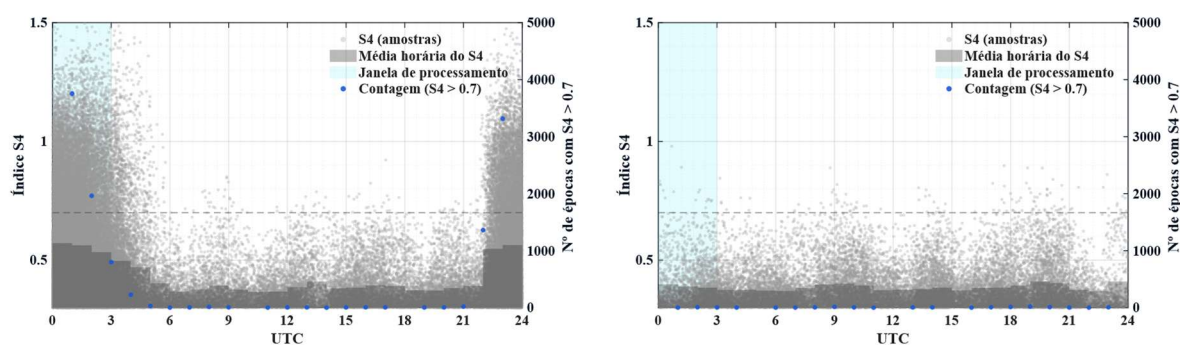
Parâmetro	Estratégia
Máscaras	Elevação: 10°; SNR: 27 dBHz.
Órbitas e Relógio	Efemérides precisas (SP3) e arquivos de relógio (CLK) do CODE, no referencial IGS20, com resolução temporal de 5 minutos e de 30 segundos, respectivamente. Interpolado para o tempo de transmissão por <i>Moving Window Lagrange Interpolation</i> de grau 9 (Zaupa, 2025).
Efeitos Neutrosféricos	Função de mapeamento VMF3 (Landskron e Böhm, 2018), atraso zenital úmido (VMF3), atraso zenital hidrostático (VMF3) + componente residual estimada.
Coordenadas e Ambiguidade	Estimado como constantes. Ambiguidades estimadas como <i>white noise</i> para ocorrência de perdas de ciclos, detectadas a partir do algoritmo TurboEdit (Blewitt, 1990).
Demais efeitos sistemáticos	Fase <i>wind-up</i> (Wu et al., 1993), Sagnac (Ashby, 2004), <i>Phase Center Offset e Variation</i> (PCO/PCV) (Montenbruck et al., 2015), <i>Observable Specific Bias</i> (OSB) (Li e Yuan, 2021), marés terrestres e oceânicas (Kouba et al., 2017) e efeito relativístico no relógio e na distância (Ashby, 2003).

Elaboração: Os Autores (2026).

3.1 Variabilidade ionosférica para o período de processamento

Para ilustrar o comportamento da ionosfera durante os períodos analisados, a Figura 3 apresenta a evolução temporal do índice S4, com base em observações GNSS registradas nas estações INCT GNSS-NAVAer para os meses de março e junho de 2024. Este índice é amplamente utilizado como indicador da intensidade da cintilação ionosférica e reflete variações rápidas na amplitude do sinal GNSS (Veetil et al., 2020). As barras correspondem às médias horárias do índice S4 ao longo de cada mês, enquanto também é apresentada a quantidade de ocorrências com S4 superior a 0,7, considerando o conjunto de observações mensais. Observa-se um padrão de flutuação ao longo do tempo, com valores mais elevados associados a uma maior instabilidade ionosférica para o mês de março, o que pode impactar diretamente a acurácia do posicionamento e o tempo de convergência das soluções PPP.

Figura 3 – Índice S4 para os meses de março (esquerda) e junho (direita) de 2024, para as estações INCT GNSS NavAer.



Elaboração: Os Autores (2026).

Observa-se que, no mês de junho, os valores do índice S4 permaneceram predominantemente abaixo de 0,6 ao longo de todo o dia, com pequenas flutuações e ausência de picos significativos. Considerando apenas os valores acima de 0,3, a média do S4 foi de 0,39. Durante o período de coleta entre 0h e 03h UTC, apenas 21 instâncias apresentaram S4 superior a 0,7. Esse comportamento reflete uma condição ionosférica relativamente calma, favorável à estabilidade das soluções GNSS de alta precisão. Em contraste, no mês de março, verifica-se um aumento expressivo dos valores de S4 entre 21h e 02h UTC, com picos superiores a 1,0 em diversos momentos. No intervalo de coleta entre 00h e 03h UTC, foi obtida uma média de S4 de 0,54, com um total de 11.300 ocorrências acima de 0,7. Esse padrão é característico de forte cintilação na amplitude do sinal e é compatível com o comportamento típico da ionosfera durante o período noturno na região equatorial, quando há maior incidência de irregularidades como as bolhas de plasma (Basu et al., 2002).

3.2 Métricas de avaliação

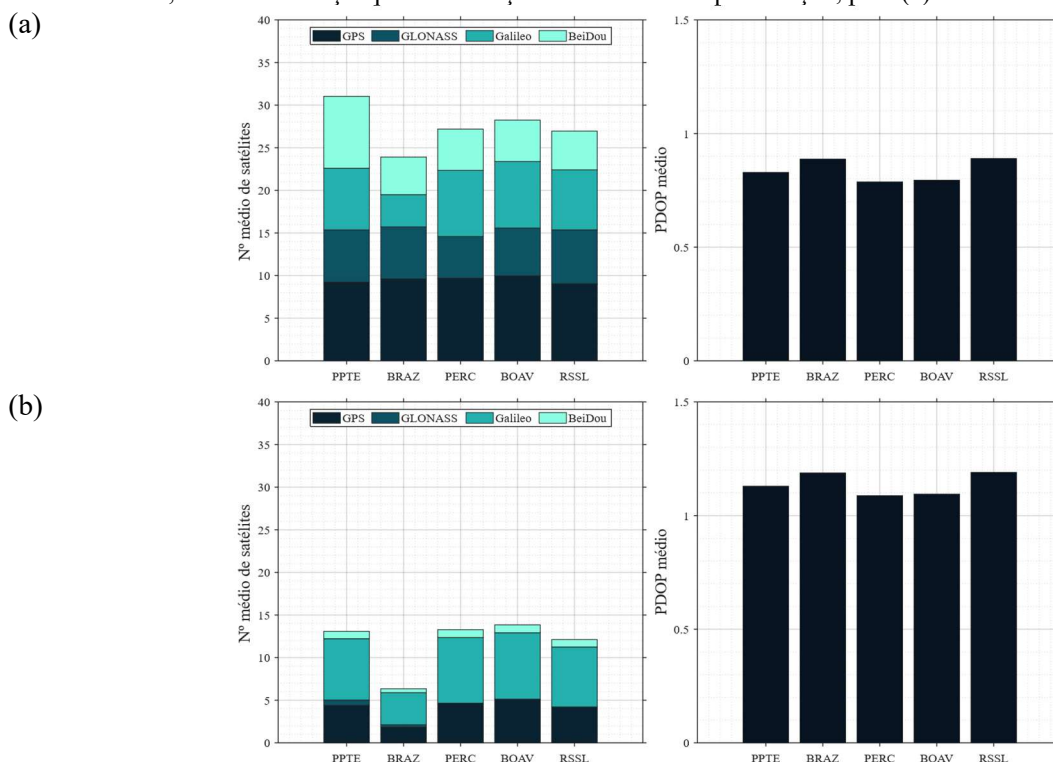
A avaliação da qualidade do posicionamento obtido por PPP multi-GNSS é conduzida a partir de três métricas centrais: acurácia posicional, resíduos das observações e tempo de convergência da solução. A acurácia é obtida pela discrepância entre as coordenadas estimadas e uma posição de referência, adotando-se as coordenadas do SIRGAS-CON (Sistema de Referência Geodésico para as Américas – *Continuously Operating Network*) atualizadas para a época de processamento, com a análise realizada no Sistema Geodésico Local (SGL) e considerando a propagação da matriz de covariância dos parâmetros posicionais. Para representar de modo mais abrangente o desempenho ao longo das épocas, utiliza-se a componente tridimensional do erro e do desvio padrão por meio da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), de forma a sintetizar a acurácia efetivamente alcançada em cada instante do processamento. A qualidade do ajustamento das observações GNSS é avaliada pela Raiz Quadrática Média (RQM) dos resíduos, a qual expressa o grau de compatibilidade entre as observações e o modelo adotado. Esse indicador é sensível a diferentes fontes de degradação, incluindo ruído de medição, imperfeições de modelagem e perturbações atmosféricas não devidamente compensadas, refletindo diretamente a consistência interna do ajustamento (Monico, 2008).

A análise do tempo de convergência tem como finalidade identificar o momento em que a solução passa a apresentar acurácia compatível com um nível predeterminado e se mantém estável até o término da sessão. Para essa finalidade, adota-se o limiar de 10 cm para as componentes horizontal e vertical (Xiang et al., 2020). Considera-se que a convergência ocorre na primeira época em que a acurácia posicional fica abaixo desses limiares e permanece continuamente dentro desse critério.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Antes de discutir os indicadores de acurácia, a Figura 4 apresenta a disponibilidade média de satélites e a geometria associada às duas combinações avaliadas, por estação. A geometria será avaliada pela Diluição de Precisão Posicional (PDOP – *position dilution of precision*), indicador que descreve a qualidade geométrica do conjunto de satélites no ajustamento e quantifica o grau de amplificação dos erros de medida na estimativa de posição.

Figura 4 – Geometria média da solução PPP multi-GNSS ao longo do conjunto total de dias analisados: número médio de satélites, com contribuição por constelação e PDOP médio por estação, para (a) IF2 e GRAPHIC e (b) IF3.

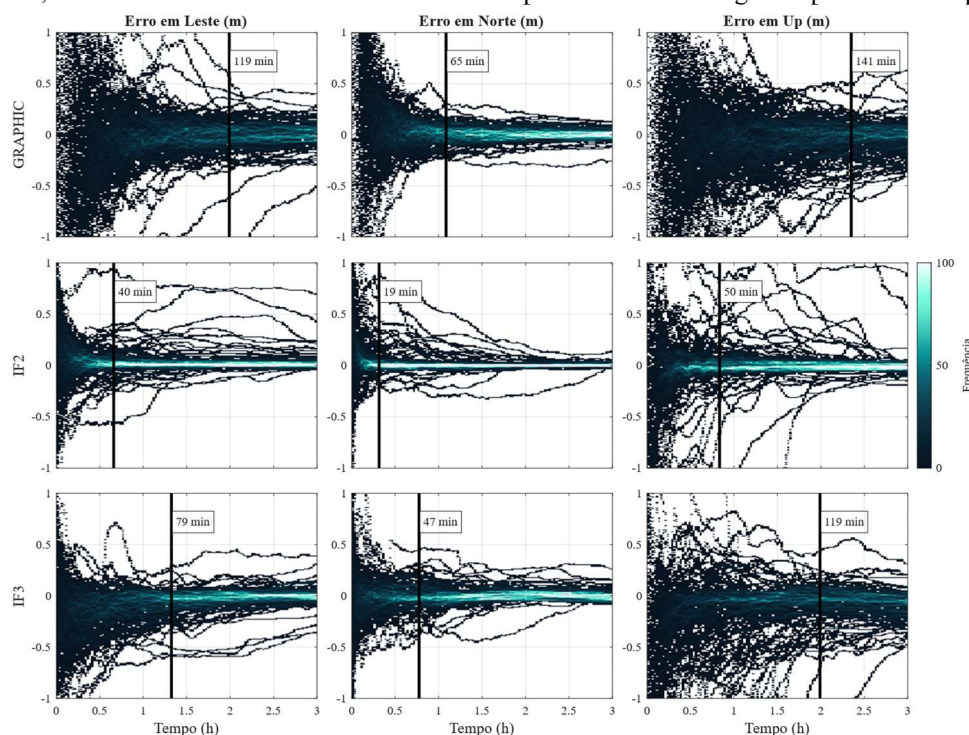


Elaboração: Os Autores (2026).

Observa-se uma diferença significativa entre as estratégias: a combinação *ion-free* de dupla frequência mantém um conjunto multi-constelação com média total de 28 satélites por época (mínimo em BRAZ, com 24 satélites), distribuídos, em média, entre GPS (10), GLONASS (6), Galileo (7) e BeiDou (5). Já na combinação *ion-free* de tripla frequência, a disponibilidade cai de forma acentuada para 12 satélites por época, com redução crítica em BRAZ (6 satélites), refletindo a menor oferta de observações simultâneas em três frequências. Além disso, a decomposição por constelação evidencia que, nessa estratégia, a solução passa a ser sustentada principalmente por Galileo (7 satélites), enquanto as contribuições de GLONASS (0,18 satélite) e BeiDou (0,81 satélite) tornam-se residuais, e o GPS reduz para cerca de 4 satélites. Essa limitação está diretamente associada (i) ao número total de satélites transmitindo sinais em tripla frequência em cada constelação e (ii) às capacidades de rastreamento dos receptores da RBMC, cujo firmware restringe a coleta de determinadas observações multifrequência, reduzindo significativamente o número de satélites disponíveis para a formação da combinação tripla. No caso do GLONASS, observa-se uma diminuição severa do número de satélites com suporte efetivo a três frequências rastreadas; para o GPS, há uma redução aproximada de 40% na quantidade de satélites utilizáveis nessa configuração. Para o BeiDou, a ausência ou baixa disponibilidade de observações B2a nos arquivos RINEX analisados limita o uso das combinações baseadas nos sinais modernizados do BDS-3, tornando a solução dependente das observações efetivamente rastreadas e registradas pelos receptores, em especial aquelas associadas aos sinais B1I/B2I/B3I. Essa limitação é compatível com o cenário descrito por Zajdel et al. (2022), que destacam que nem todos os sinais são suportados pelos receptores, em função de restrições de canais de rastreamento, configuração ou firmware desatualizado.

A Figura 5 apresenta os mapas de densidade das discrepâncias posicionais obtidas para março de 2024, considerando os métodos GRAPHIC, IF2 e IF3, com os resultados agregados para todas as estações selecionadas e para todos os dias processados. A organização da figura permite comparar o comportamento temporal das componentes Leste, Norte e Up entre as três estratégias de processamento. As linhas verticais indicam o tempo médio de convergência calculado para cada componente, considerando o conjunto completo de estações e dias analisados. Nos casos em que a solução não atingiu o critério de convergência dentro da sessão de processamento, foi atribuído o tempo máximo da sessão, correspondente a 180 minutos, de modo que esses casos também fossem incorporados à estatística agregada.

Figura 5 – Mapas de densidade da discrepância posicional em SGL para março de 2024, considerando os métodos GRAPHIC, IF2 e IF3. As linhas verticais indicam o tempo médio de convergência para cada componente.



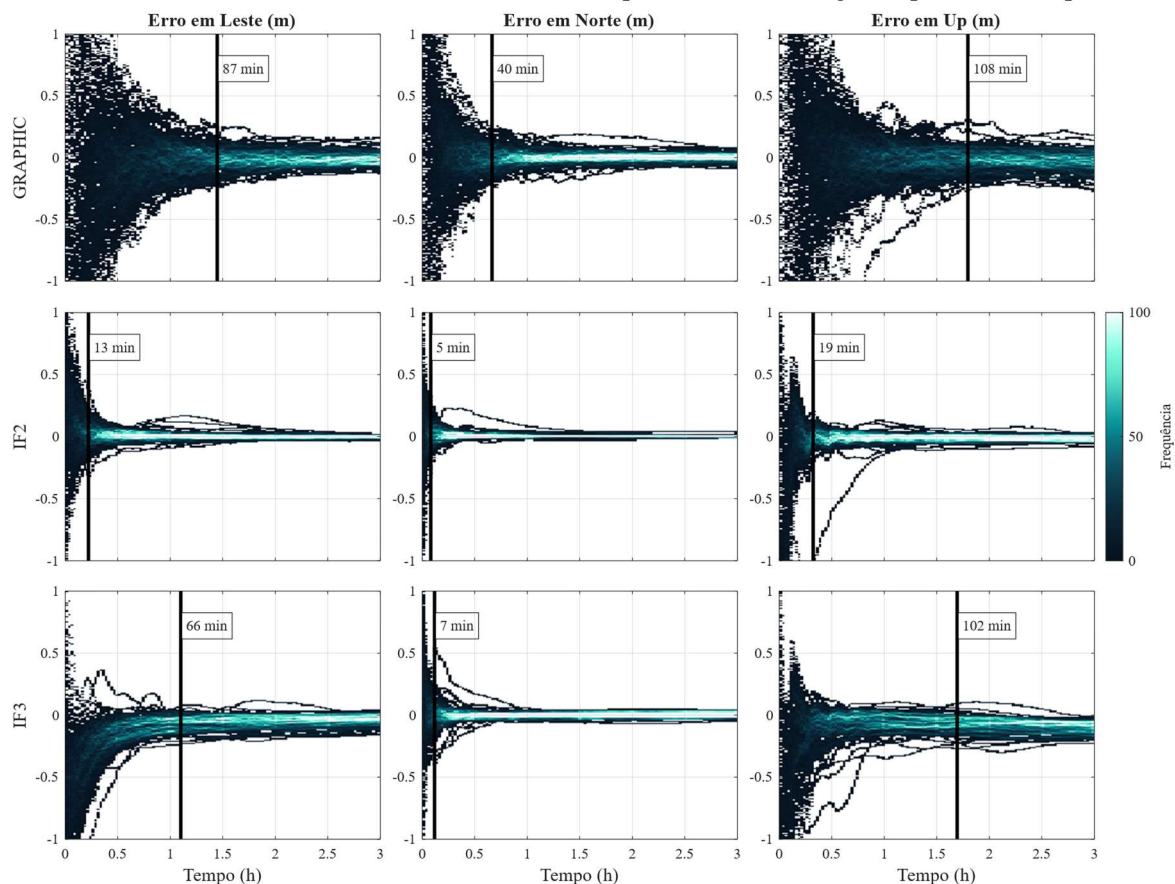
Elaboração: Os Autores (2026).

Observa-se que o método GRAPHIC apresenta maior dispersão ao longo das três horas iniciais, com discrepâncias finais ainda elevadas em algumas estações. Nas últimas épocas, os erros horizontais médios variaram de aproximadamente 7,2 cm em RSSL a 15,8 cm em BRAZ, enquanto os erros verticais ficaram entre 8,2 cm em RSSL e 17,9 cm em BRAZ, indicando menor estabilização da solução em relação às estratégias *ion-free*. Para a combinação IF2, verifica-se o melhor desempenho geral entre os métodos avaliados, com maior concentração das discrepâncias próximas de zero e menor erro residual ao final do processamento. Nas últimas épocas, os erros horizontais médios variaram de 1,3 cm em RSSL a 9,0 cm em BRAZ, enquanto os erros verticais ficaram entre 2,2 cm em RSSL e 8,5 cm em BRAZ.

Apesar do desempenho inferior em BRAZ, a estratégia IF2 apresentou comportamento mais estável nas demais estações, com erros finais predominantemente na ordem de poucos centímetros, evidenciando melhor compromisso entre convergência, estabilidade e acurácia final. O IF3 apresentou desempenho intermediário entre os demais métodos, mas com degradação mais evidente na componente vertical. Nas últimas épocas, os erros horizontais médios variaram de 3,1 cm em RSSL a 10,0 cm em BOAV, enquanto os erros verticais variaram de 5,3 cm em RSSL a 17,9 cm em PERC. Esse comportamento indica que a inclusão da terceira frequência não resultou, neste experimento, em melhoria sistemática da solução, sendo especialmente penalizada na componente Up. Em comparação com IF2, a IF3 apresentou maior dispersão residual e maiores incertezas formais, sugerindo que a redução da disponibilidade de observações de tripla frequência e a consequente degradação geométrica limitaram os ganhos potenciais associados ao uso de sinais adicionais.

A Figura 6 apresenta os mapas de densidade das discrepâncias posicionais obtidas para junho de 2024, considerando os métodos utilizados, com os resultados agregados para todas as estações selecionadas.

Figura 6 – Mapas de densidade da discrepância posicional em SGL para junho de 2024, considerando os métodos GRAPHIC, IF2 e IF3. As linhas verticais indicam o tempo médio de convergência para cada componente.



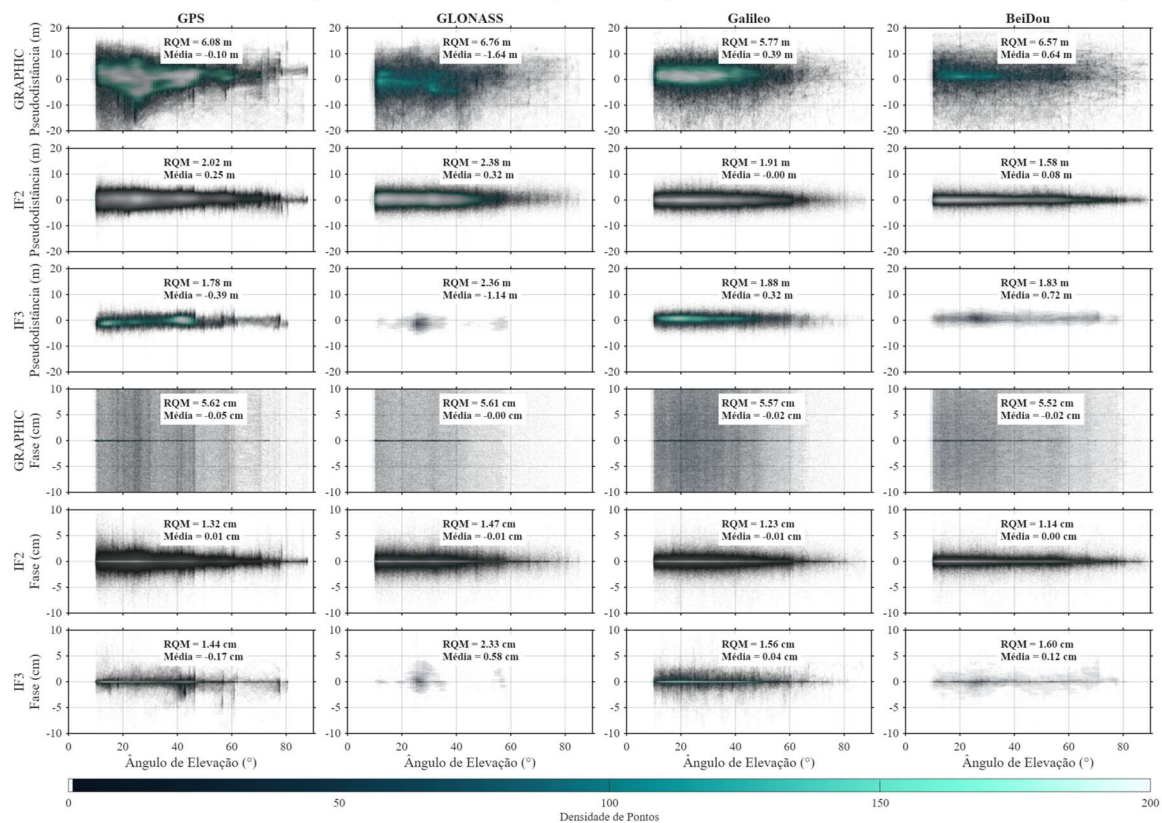
Elaboração: Os Autores (2026).

Nas últimas épocas, para o GRAPHIC, os erros horizontais médios variaram de aproximadamente 3,4 cm em PPTE a 6,5 cm em RSSL, enquanto os erros verticais ficaram entre 4,6 cm em PPTE e 7,7 cm em BRAZ, indicando estabilização final moderada, porém ainda inferior à obtida com IF2. Para a combinação

IF2, verifica-se novamente o melhor desempenho geral entre os métodos avaliados, com maior concentração das discrepâncias próximas de zero e menor erro residual ao final do processamento. Nas últimas épocas, os erros horizontais médios variaram de 0,5 cm em PPTE a 1,2 cm em BOAV, enquanto os erros verticais ficaram entre 0,9 cm em BOAV e 2,9 cm em PERC. Esses valores indicam desempenho final predominantemente centimétrico baixo, com pequena variabilidade entre estações e melhor estabilização das componentes posicionais, sobretudo quando comparado ao GRAPHIC e à IF3. A estratégia IF3 apresentou desempenho inferior ao IF2 e, em algumas estações, também maior erro residual do que o GRAPHIC, especialmente na componente vertical. Nas últimas épocas, os erros horizontais médios variaram de aproximadamente 3,2 cm em BRAZ e PERC a 7,9 cm em PPTE, enquanto os erros verticais variaram de 7,6 cm em RSSL a 11,7 cm em BOAV. A penalização vertical foi mais evidente em PERC e BOAV, com erros médios finais superiores a 11 cm, indicando que a inclusão da terceira frequência não resultou em melhoria sistemática da solução nesse conjunto de dados. Esse comportamento sugere que a redução da disponibilidade de observações em tripla frequência e a possível degradação geométrica limitaram os benefícios esperados do uso de sinais adicionais.

Considerando conjuntamente os resultados apresentados nas Figuras 5 (março) e 6 (junho), observa-se uma melhoria expressiva do desempenho da combinação IF2 em relação às demais estratégias, tanto em termos de acurácia quanto de tempo de convergência. Em março, a IF2 reduz os erros horizontais finais em aproximadamente 70% a 85% em comparação com o método GRAPHIC e em cerca de 50% a 75% em relação à tripla frequência, enquanto na componente vertical essas reduções chegam a 60%–80% frente ao GRAPHIC e 40%–70% frente à IF3. Em junho, embora todos os métodos apresentem melhor desempenho devido às condições ionosféricas mais estáveis, a IF2 ainda mantém vantagem, com reduções típicas de 50%–70% em relação ao GRAPHIC e de 30%–60% em relação à tripla frequência. No que se refere ao tempo de convergência, os resultados indicam que a IF2 converge significativamente mais rápido: em março, a redução é da ordem de 30% a 50% em relação à tripla frequência, enquanto em junho essa diferença permanece relevante, ainda que menor, situando-se entre 20% e 40%. A Figura 7 apresenta os resíduos das observações em função do ângulo de elevação para março de 2024, considerando os métodos GRAPHIC, IF2 e IF3, com os resultados agregados para todas as estações analisadas.

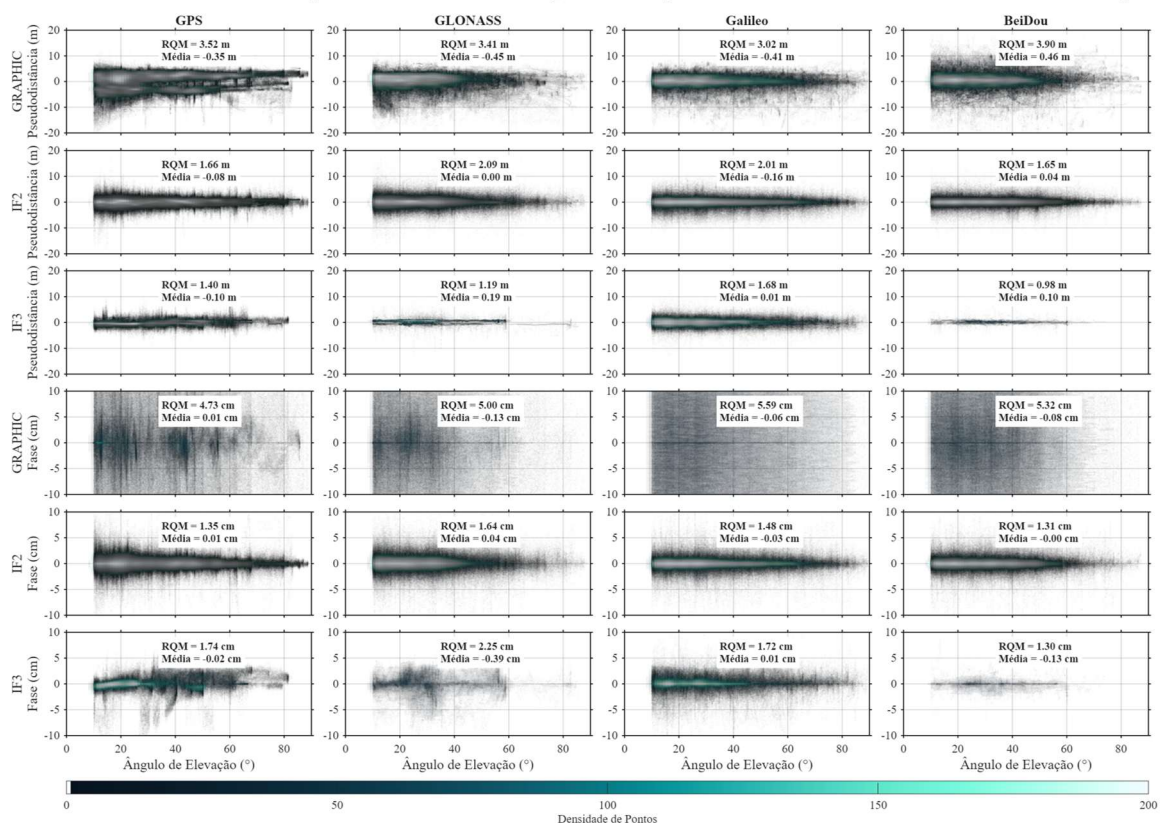
Figura 7 – Resíduos das observações em função do ângulo de elevação para março de 2024, considerando os métodos GRAPHIC, IF2 e IF3. As três primeiras linhas correspondem à pseudodistância e as três últimas à fase da portadora.



Elaboração: Os Autores (2026).

A Figura 8 apresenta os resíduos das observações, para diferentes métodos, em função do ângulo de elevação para junho de 2024, com os resultados agregados para todas as estações analisadas. Os resíduos apresentam o comportamento esperado em função da elevação, com maior dispersão para satélites próximos ao horizonte e redução gradual em elevações mais altas, devido ao menor percurso atmosférico e à menor influência relativa de multicaminho e ruído de medição. Esse efeito é mais evidente na pseudodistância, enquanto os resíduos de fase das combinações *ion-free* permanecem mais concentrados em torno de zero, com variações predominantemente centimétricas. No caso do GRAPHIC, a utilização da *quasi-carrier* propaga o ruído da pseudodistância, degradando os resíduos associados à fase quando comparados às combinações IF2 e IF3. A maior concentração de resíduos próximos de zero ocorre, em geral, em faixas intermediárias de elevação, nas quais há maior recorrência geométrica das observações e condições mais favoráveis de enlace. Comparando-se os meses analisados, junho apresenta valores de RQM ligeiramente menores e distribuição mais controlada, coerente com a menor variabilidade ionosférica do período; entretanto, a diferença em relação a março não é necessariamente proporcional à intensidade da cintilação, pois o controle de qualidade remove observações discrepantes e reduz o peso de observações degradadas por meio da inflação de suas incertezas. Assim, os efeitos mais severos da cintilação tendem a se manifestar de forma mais evidente na disponibilidade de observações, na estabilidade da solução e no tempo de convergência do que apenas nos resíduos finais analisados.

Figura 8 – Resíduos das observações em função do ângulo de elevação para junho de 2024, considerando os métodos GRAPHIC, IF2 e IF3. As três primeiras linhas correspondem à pseudodistância e as três últimas à fase da portadora.



Elaboração: Os Autores (2026).

5 CONCLUSÃO

A análise conduzida neste estudo permitiu comparar, em estações brasileiras da RBMC, o desempenho do PPP multi-GNSS com três estratégias de mitigação ionosférica, incluindo o método GRAPHIC e combinações *ion-free* de dupla e tripla frequência, considerando períodos com variabilidade ionosférica contrastante (março e junho de 2024). Inicialmente, observou-se que a disponibilidade de observações é um fator estrutural determinante para o comportamento da solução: a combinação de dupla frequência preservou um cenário efetivamente multi-constelação, com maior número médio de satélites por época e geometria mais

favorável, enquanto a tripla frequência reduziu de forma acentuada o conjunto de satélites válidos, com perda de diversidade entre constelações e consequente degradação geométrica, evidenciada pelo aumento do PDOP entre estações (Figura 4). Essa limitação, associada à menor oferta de rastreamento simultâneo em três frequências, explica parte relevante do desempenho inferior observado na estratégia tripla, independentemente do mês analisado.

Os resultados obtidos neste estudo, ainda de caráter preliminar, diferem parcialmente do que é reportado na literatura, na qual a tripla frequência apresenta benefícios principalmente na redução do tempo de convergência e no tratamento de efeitos ionosféricos residuais, enquanto os ganhos em acurácia final tendem a ser limitados. No presente trabalho, entretanto, a estratégia IF3 não superou a combinação IF2, o que pode ser explicado por fatores associados à estratégia e à modelagem adotada, incluindo o uso direto da tripla frequência sem tratamento explícito de vieses IFB, a consistência dos produtos de órbita e relógio baseados em dupla frequência, bem como a menor disponibilidade efetiva de observações tripla frequência, que impacta negativamente a geometria da solução. Adicionalmente, a análise foi conduzida em condições ionosféricas tropicais, mais desafiadoras e menos exploradas em estudos controlados da literatura, o que pode amplificar essas limitações. Dessa forma, os resultados não invalidam os potenciais benefícios da tripla frequência, mas indicam que sua aplicação prática depende criticamente da modelagem adotada, da disponibilidade dos sinais e do ambiente de propagação considerado.

Em termos de acurácia posicional, os mapas de densidade evidenciaram diferenças consistentes entre as estratégias avaliadas para cada mês. Em março (Figura 5), sob maior variabilidade ionosférica, observou-se maior dispersão temporal e entre estações para todos os métodos, com casos de degradação persistente ao longo das três horas de processamento. Nesse cenário, a combinação *ion-free* de dupla frequência apresentou, de modo geral, menores discrepâncias finais e convergência mais rápida, sobretudo nas componentes horizontais, enquanto a componente vertical permaneceu mais sensível e exigiu maior tempo para estabilização. O método GRAPHIC apresentou maior espalhamento e menor estabilidade, enquanto a estratégia de tripla frequência foi penalizada tanto no tempo de convergência quanto na acurácia final, com degradação mais evidente na componente vertical. Em junho (Figura 6), sob condições ionosféricas mais favoráveis, observou-se comportamento mais controlado das soluções, com maior concentração das discrepâncias em níveis centimétricos e menor espalhamento em relação a março. Ainda assim, a combinação de dupla frequência manteve o melhor desempenho global, enquanto a tripla frequência não apresentou melhoria sistemática, especialmente na componente vertical. O método GRAPHIC apresentou maior variabilidade residual associada à propagação do ruído da pseudodistância na observável *quasi-carrier*.

A avaliação dos resíduos em função do ângulo de elevação (Figuras 7 e 8) reforçou o comportamento característico do enlace GNSS, com maior espalhamento em baixas elevações e redução gradual da dispersão à medida que o ângulo de elevação aumenta, efeito associado ao maior caminho atmosférico, à maior suscetibilidade a multicaminho e à degradação geométrica em ângulos rasantes. Esse padrão foi mais pronunciado na pseudodistância, enquanto os resíduos de fase permaneceram concentrados em torno de zero, com variações predominantemente centimétricas. A comparação entre métodos mostrou que a combinação de dupla frequência apresentou menor dispersão ao longo de toda a faixa de elevação, indicando melhor controle do ruído efetivo, enquanto o método GRAPHIC exibiu maior espalhamento, sobretudo em baixas elevações. A estratégia de tripla frequência apresentou comportamento intermediário, porém com maior variabilidade na pseudodistância em relação à dupla frequência, especialmente em março. Comparado a março, junho apresentou resíduos mais controlados e menores valores de RQM em parte das análises. Essa diferença, porém, não é tão acentuada nos gráficos, pois os resíduos analisados já refletem o controle de qualidade do processamento, com remoção de outliers e redução do peso de observações degradadas.

Em síntese, os resultados indicam que, para o conjunto de estações e condições avaliadas, a estratégia de dupla frequência apresentou melhor compromisso entre disponibilidade de observações, geometria, rapidez de convergência e desempenho final, enquanto a tripla frequência foi sistematicamente penalizada pela redução do número de satélites úteis e pela degradação geométrica, refletindo-se em maior tempo de convergência e maior erro residual final, principalmente na vertical e no período de maior variabilidade ionosférica. Esses achados reforçam que ganhos potenciais associados ao uso de sinais adicionais dependem criticamente da disponibilidade multi-constelação efetiva em três frequências e das condições do meio de propagação, de modo

que a adoção operacional da estratégia tripla deve ser acompanhada de critérios de rastreamento/qualidade e de avaliação de geometria para evitar perdas de desempenho em cenários tropicais.

Como perspectiva de continuidade, recomenda-se a realização de experimentos específicos em períodos de elevada perturbação ionosférica, incluindo eventos associados a tempestades geomagnéticas intensas, como a tempestade geomagnética do Dia das Mães (*Mother's Day Storm*), observada em maio de 2024. Nesses cenários, os efeitos de irregularidades ionosféricas, cintilação e rápida variação do conteúdo eletrônico total tendem a ser significativamente amplificados. A investigação nesses cenários é fundamental para avaliar a robustez das estratégias multifrequência em condições extremas e verificar se o aumento da redundância espectral pode, de fato, contribuir para mitigar os efeitos degradantes do meio de propagação ou, alternativamente, acentuar limitações já observadas em condições nominais.

Referências

- Aguiar, C. R., Monico, J. F. G., & Moraes, A. O. (2025). Impact of ionospheric scintillations on GNSS availability and precise positioning. *Space Weather*, 23, e2024SW004217. DOI: 10.1029/2024SW004217.
- Ashby, N. (2003). Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*, 6, 1. DOI: 10.12942/lrr-2003-1
- Ashby, N. (2004). The Sagnac effect in the Global Positioning System. In G. Rizzi & M. L. Ruggiero (Eds.), *Relativity in rotating frames: Relativistic physics in rotating reference frames* (pp. 11–28). Kluwer Academic Publishers.
- Basu, S., Groves, K. M., Basu, S., & Sultan, P. J. (2002). Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: current status and future plans. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(16), 1745–1754. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00124-4
- Blewitt, G. (1990). An automated editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 17(3), 199–202.
- Choy, S. (2009). *An investigation into the accuracy of single frequency precise point positioning (PPP)* [Doctoral dissertation, RMIT University].
- Dal Poz, W. R., Silva, A. C., Santos, A. P. dos, Medeiros, N. das G., Ferreira, Í. O., & Oliveira, J. C. de. (2025). Impacts of the Great May 2024 geomagnetic storm on precise point positioning. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(3), 1697–1713. DOI: 10.26848/rbgf.v18.3.p1697-1713
- Deo, M., & El-Mowafy, A. (2017). Triple-frequency GNSS models for PPP with float ambiguity estimation: performance comparison using GPS. *Survey Review*, 50(360), 249–261. DOI: 10.1080/00396265.2016.1263179
- Elsheikh, M., Iqbal, U., Noureldin, A., & Korenberg, M. (2023). *The implementation of precise point positioning (PPP): a comprehensive review*. *Sensors*, 23, 8874. DOI: 10.3390/s23218874
- Ge, Y., Dai, P., Qin, W., Yang, X., Zhou, F., Wang, S., & Zhao, X. (2019). Performance of multi-GNSS precise point positioning time and frequency transfer with clock modeling. *Remote Sensing*, 11, 347. DOI: 10.3390/rs11030347
- Glaner, M. F., & Weber, R. (2023). An open-source software package for precise point positioning: raPPPid. *GPS Solutions*, 27, 174. DOI: 10.1007/s10291-023-01488-4
- Hauschild, A. (2017). Combinations of observations. In: P. J. G. Teunissen & O. Montenbruck (Eds.), *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer.
- Hobiger, T. & Jakowski, N. (2017). Atmospheric Signal Propagation. In: P. J. G. Teunissen & O. Montenbruck (Eds.), *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer.
- Jiang, X., Li, H., Guo, L., Ye, D., Yang, K., & Li, J. (2024). Research on the Ionospheric Delay of Long-Range Short-Wave Propagation Based on a Regression Analysis. *Remote Sensing*, 16(3), 553. DOI: 10.3390/rs16030553
- Klobuchar, J. A. (1987). Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Transactions*

- on *Aerospace and Electronic Systems*, AES-23(3), 325–331.
- Kouba, J., Lahaye, F., & Tétreault, P. (2017). Precise Point Positioning. In: Teunissen, P. J. G.; Montenbruck, O. (eds) *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer, Berlin.
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: Refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349–360. DOI: 10.1007/s00190-017-1066-2
- Li, M., & Yuan, Y. (2021). Estimation and analysis of the observable-specific code biases estimated using multi-GNSS observations and global ionospheric maps. *Remote Sensing*, 13(16), 3096. DOI: 10.3390/rs13163096
- Marques, H. A., Monico, J. F. G., Marques, H. A. S., Susi, M., Borio, D., Park, J., & Węzka, K. (2025). Evaluating GPS and Galileo Precise Point Positioning (PPP) Under Various Ionospheric Conditions During Solar Cycle 25. *Remote Sensing*, 17(18), 3169. DOI: 10.3390/rs17183169
- Matsuoka, M. T., Collischonn, C., Klein, I., Camargo, P. O., & Pereira, V. A. S. (2013). Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas*.
- Monico, J. F. G. (2008). *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. (2. ed.). Editora UNESP.
- Monico, J. F. G., de Paula, E. R., Moraes, A. O. et al. (2022). The GNSS NavAer INCT project overview and main results. *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 14. DOI: 10.1590/jatm.v14.1249
- Montenbruck, O., Schmid, R., Mercier, F., Steigenberger, P., Noll, C., Fatkulín, R., Kogure, S., & Ganeshan, A. (2015). GNSS satellite geometry and attitude models. *Advances in Space Research*, 56(6), 1015–1029. DOI: 10.1016/j.asr.2015.06.019
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K., & Schaer, S. (2017). The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS): Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, 59(7), 1671–1697. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.011
- Moraes, A. O., de Paula, E. R., Muella, M. T. A. H., & Perrella, W. J. (2014). On the second order statistics for GPS ionospheric scintillation modeling. *Radio Science*, 49(2), 94–105. DOI: 10.1002/2013RS005270
- Schönemann, E. (2014). *Analysis of GNSS raw observations in PPP solutions*. [Tese de Doutorado, Technische Universität Darmstadt].
- Shi, C., Gu, S., Lou, Y., & Ge, M. (2012). An improved approach to model ionospheric delays for single-frequency precise point positioning. *Advances in Space Research*, v. 49, n. 12, p. 1698–1708. DOI: 10.1016/j.asr.2012.03.016
- Sousasantos, J., Rodrigues, F.S., Moraes, A.O. et al. (2024). On the estimation of scintillation severity using background F-region peak densities: description and example results using GOLD observations. *GPS Solut* 28, 62. DOI: 10.1007/s10291-023-01602-6
- Su, K., & Jin, S. (2019). Triple frequency carrier phase precise time and frequency transfer models for BDS 3. *GPS Solutions*, 23, 86. DOI: 10.1007/s10291-019-0879-2
- Su, K., Jin, S., & Jiao, G. (2020). Assessment of multi-frequency global navigation satellite system precise point positioning models using GPS, BeiDou, GLONASS, Galileo and QZSS. *Measurement Science and Technology*, 31. DOI: 10.1088/1361-6501/ab69d5
- Tegedor, J., & Øvstedal, O. (2014). *Triple carrier precise point positioning (PPP) using GPS L5*. *Survey Review*, 46(337). DOI: 10.1179/1752270613Y.0000000076
- Teunissen, P. J. G., & Montenbruck, O. (Eds.). (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1
- Tian, Y., Gong, X., Zheng, F. et al. (2026). An instantaneous and reliable precise point positioning integer ambiguity resolution method based on multistage residual tests. *GPS Solut* 30, 6. DOI: 10.1007/s10291-025-01974-x

- Veetil, S. V., Aquino, M., Marques, H. A., & Moraes, A. (2020). Mitigation of ionospheric scintillation effects on GNSS precise point positioning (PPP) at low latitudes. *Journal of Geodesy*, 94, 15. DOI: 10.1007/s00190-020-01345-z
- Wang, Z., Wang, R., Wang, Y., Hu, C., & Liu, B. (2022). Modelling and assessment of a new triple-frequency IF1213 PPP with BDS/GPS. *Remote Sensing*, 14(18), 4509. DOI: 10.3390/rs14184509
- Wu, J. T., Wu, S. C., Hajj, G. A., Bertiger, W. I., & Lichten, S. M. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, 18(2), 91–98. DOI: 10.1007/BF03655303
- Wu, Z., Wang, Q., Yu, Z., Hu, C., Liu, H., & Han, S. (2022). Modeling and performance assessment of precise point positioning with multi-frequency GNSS signals. *Measurement*. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111687
- Xiang, Y., Gao, Y., & Li, Y. (2020). Reducing convergence time of precise point positioning with ionospheric constraints and receiver differential code bias modeling. *Journal of Geodesy*, 94(8). DOI: 10.1007/s00190-019-01334-x
- Yang, H., Ren, X., Liu, M., & Zhang, X. (2024). Dual-frequency to five-frequency real-time precise point positioning using new BDS-3 PPP-B2b service. *Earth, Planets and Space*, 76, 82. DOI: 10.1186/s40623-024-02031-6
- Yang, Z., & Morton, Y. T. J. (2025). Impacts of the May 2024 extreme geomagnetic storm on global high-accuracy GPS positioning solutions. *Space Weather*, 23. DOI: 10.1029/2025SW004547
- Zajdel, R., Steigenberger, P., & Montenbruck, O. (2022). On the potential contribution of BeiDou-3 to the realization of the terrestrial reference frame scale. *GPS Solutions*, 26, 109. DOI: 10.1007/s10291-022-01298-0
- Zaupa, J. P. V., Alves, D. B. M., & Setti Jr, P. T. (2022). Influência da ionosfera no posicionamento por ponto GPS e multi-GNSS em diferentes períodos do dia. [Trabalho apresentado]. XII CBCG (Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas) e V SBG (Simpósio Brasileiro de Geomática), Curitiba, PR, Brasil.
- Zaupa, J. P. V. (2025). *Posicionamento por ponto preciso multi-GNSS: implementação e análises*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”]. Repositório Institucional UNESP. <https://hdl.handle.net/11449/313230>.
- Zaupa, J. P. V., Alves, D. B. M., & Setti Jr, P. T. (2025). Robustez das combinações livres da ionosfera no PPP multi-GNSS sob diferentes níveis de variabilidade ionosférica para uma estação de monitoramento brasileira. I Congresso Internacional de Regularização Fundiária & VIII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (I CIRF & VIII SIMGEO), Recife, PE, Brazil. DOI: 10.5281/zenodo.17135729
- Zaupa, J. P. V., Alves, D. B. M., & Setti Jr., P. T. (2026a). APPPOLO: A Brazilian processing software for multi-GNSS precise point positioning. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-3/W4-2025, 379–385. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-3-W4-2025-379-2026
- Zaupa, J. P. V., de Souza, F. T. L., Ferreira, L. G., Yamashiro, H. Y., Gouveia, T. A. F., Alves, D. B. M., Monico, J. F. G., Pereira, V. A. S., & Setti Júnior, P. T. (2026b). Ionospheric and neutrosphere impacts on multi-GNSS kinematic PPP during geomagnetic storms: A global study. *Sensors*, 26(13), 4037. DOI: 10.3390/s26134037
- Zhang, Q., Zhao, L., & Zhao, L. (2021). A two-step robust adaptive filtering algorithm for GNSS kinematic precise point positioning. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(10), 210–219. DOI: 10.1016/j.cja.2020.10.033

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pela disponibilização dos dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), ao INCT GNSS-NavAer, pela disponibilização dos dados de cintilação ionosférica, e ao *Center for Orbit Determination in*

Europe (CODE), pelos produtos precisos utilizados no processamento. Esta pesquisa foi parcialmente financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2024/22757-0, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos nº 306112/2023-0 e 313902/2025-9.

Contribuição dos Autores

João P. V. Zaupa: conceituação, metodologia, software, curadoria dos dados, análise formal, investigação, validação, visualização, escrita – primeira redação e escrita – revisão e edição. Daniele B. M. Alves: conceituação, metodologia, supervisão, administração do projeto, obtenção de financiamento, recursos e escrita – revisão e edição. Paulo T. Setti Jr.: metodologia, validação, análise formal, supervisão, recursos e escrita – revisão e edição.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Biografia do autor principal



João Pedro Voltare Zaupa, natural de Álvares Machado (SP), é doutorando em Ciências Cartográficas na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, Brasil. Obteve o título de mestre em Ciências Cartográficas pela mesma instituição, com ênfase em Posicionamento Geodésico. Seus interesses de pesquisa incluem Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), processamento multi-GNSS, resolução de ambiguidades e efeitos ionosféricos em sinais GNSS.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.