

Contribuição do uso de múltiplas constelações GNSS no posicionamento por ponto preciso aplicado ao monitoramento

Contribution of Using Multiple GNSS Constellations in Precise Point Positioning Applied to Monitoring

Vitor Corrêa de Brito¹; Paulo Sergio de Oliveira Junior²; Pedro Luís Faggion³

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: vitorcorreia_ps@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0567-074X>

² Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: paulo.junior@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7000-6924>

³ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: pedro.faggion@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4881-8720>

Resumo: Com a evolução das constelações GNSS e dos algoritmos de posicionamento, o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) tem se consolidado como uma alternativa viável para o monitoramento geodésico de estruturas em ambientes urbanos. Este trabalho investiga o desempenho do método PPP utilizando diferentes combinações de constelações GNSS – GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou – em ambiente controlado, com simulação de deslocamentos horizontais e análise estatística dos resultados. A metodologia consistiu na coleta de dados com receptor GNSS em pontos com deslocamentos previamente definidos, seguidos de processamento com o software RTKLIB e aplicação do teste t de Student para verificação de diferenças significativas. Os resultados demonstraram que, embora o uso do MULTI-GNSS tenha ampliado a robustez das soluções, a combinação GPS + Galileo apresentou desempenho estatisticamente comparável, sobretudo em condições mais estáveis de rastreio. Constatou-se, no entanto, que ambas as configurações ainda apresentaram limitações para a detecção precisa de deslocamentos milimétricos quando utilizados suportes menos rígidos. Os dados altimétricos também indicaram variabilidade significativa, apontando para a necessidade de refinamento dos modelos de correção vertical. Demonstrando que o PPP com múltiplas constelações e com GPS + Galileo pode ser eficaz no monitoramento urbano, desde que respeitados os limites operacionais e estruturais do ambiente de aplicação.

Palavras-chave: PPP 1; RTKLIB 2; Multi-constelações 3.

Abstract: With the evolution of GNSS constellations and positioning algorithms, Precise Point Positioning (PPP) has established itself as a viable alternative for the geodetic monitoring of structures in urban environments. This study investigates the performance of the PPP method using different combinations of GNSS constellations – GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou – in a controlled setting, with simulated horizontal displacements and statistical analysis of the results. The methodology involved GNSS data collection at points with predefined displacements, followed by processing with RTKLIB software and application of the Student's t-test to assess significant differences. The results showed that although the use of MULTI-GNSS increased the robustness of the solutions, the GPS + Galileo combination delivered statistically comparable performance, especially under more stable tracking conditions. However, it was found that both configurations still present limitations in the precise detection of millimetric displacements when less rigid supports were used. The altitude data also showed significant variability, indicating the need for refinement in vertical correction models. This demonstrates that PPP using multiple constellations or GPS + Galileo can be effective for urban monitoring, provided that the operational and structural constraints of the application environment are respected.

Keywords: PPP 1; RTKLIB 2; Multi-constellation 3.

1. Introdução

O posicionamento por satélites por meio da tecnologia *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) é importante nos projetos de engenharia, voltados para a determinação de coordenadas de pontos sobre as feições de interesse. Nos últimos anos com a evolução da eletrônica e a era dos satélites artificiais, o GNSS vem sendo utilizado com maior frequência, uma vez que estão disponíveis maiores números de satélites e constelações, permitindo que os algoritmos de posicionamento GNSS obtenham coordenadas mais precisas para o usuário final. Dentre as constelações GNSS disponíveis destacam-se o *Global Positioning System* (GPS), o *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS), o Galileo e o *BeiDou Satellite System* (BDS) (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

Dentre os principais métodos de posicionamento pelo GNSS, pode-se assumir a seguinte subdivisão: métodos de posicionamento absoluto e métodos de posicionamento relativo (diferencial). Existem também outros métodos resultantes de combinações das duas vertentes (absoluto e relativo), e em especial para aplicações em tempo real, têm forte destaque os métodos baseados em soluções de redes de estações de referência (*network based positioning*) (OLIVEIRA JR, 2017; WÜBBENA; SCHMITZ; BAGGE, 2005). De forma geral, para o usuário, nos métodos absolutos, empregando-se apenas um receptor GNSS, é possível determinar a posição da antena do receptor. Por outro lado, nos métodos relativos, existe a necessidade de no mínimo 2 ou mais receptores GNSS coletando informações simultaneamente para estabelecer a posição da antena do receptor do usuário (MONICO, 2008).

Uma das aplicações do posicionamento pelo GNSS é o monitoramento de estruturas naturais e artificiais, sobretudo para fins de prevenção de desastres que possam causar perdas financeiras, ambientais e humanas. Nesse caso, o posicionamento pelo GNSS é empregado para determinação de parâmetros de movimentações que permitem caracterizar os deslocamentos de uma malha de pontos (rede), muitos dos quais situados na própria estrutura a ser monitorada. Dessa forma, usualmente almeja-se precisão de qualidade melhor que o nível centimétrico (CHAVES; SEGANTINE, 2014; CALDAS; CHAVES, 2014; OLIVEIRA JR, 2015).

De forma geral, o posicionamento relativo é mais aplicado em trabalhos de monitoramento, entretanto um dos métodos de posicionamento absoluto, o chamado Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), permite que as coletas realizadas com apenas um receptor GNSS obtenham bons resultados (acurácia ao nível centimétrico) após o pós-processamento dos dados obtidos (IBGE, 2021). Muitas das estruturas que se almeja monitorar encontram-se em grandes centros urbanos, onde a presença de arranha-céus pode afetar significativamente a disponibilidade de dados. Isso ocorre devido à forte obstrução e reflexão de sinais eletromagnéticos nesses locais, provocada pelos efeitos de multicaminhamento sobre os sinais GNSS.

Estudos recentes buscam evidenciar os ganhos obtidos quando se emprega o posicionamento MULTI-GNSS, ou seja, o uso de diversas constelações de forma combinada. Nesse sentido, Lin *et al.* (2021) aplicaram o posicionamento MULTI-GNSS para o monitoramento de deslizamentos de terra pelo método PPP. Os autores concluíram que a utilização de múltiplos sistemas de navegação por satélite (MULTI-GNSS) permite que a solução de PPP alcance uma acurácia centimétrica em cerca de 30 minutos de ocupação do ponto rastreado. Nesse mesmo trabalho, os autores concluem que o método PPP com MULTI-GNSS pode atender aos critérios para monitoramento de rápidos deslizamentos de terra.

Song e Zhao (2021) demonstram o potencial de soluções diárias e horárias pelo método de PPP com o uso de múltiplas frequências na região europeia. Nesse trabalho os autores concentram esforços em avaliar sobretudo a constelação Galileo e apontam que alguns dos desafios que podem degradar a qualidade do posicionamento são os erros do relógio e as combinações das observáveis Galileo (E1/E5a e E1/E5b). Ainda assim os autores concluem que é possível produzir soluções diárias de qualidade milimétrica e soluções horárias de qualidade centimétrica.

No Brasil, vários estudos buscaram alternativas para uso do PPP, tais como Collischonn e Matsuoka (2016) que apresentam uma metodologia para o desenvolvimento de rede utilizando dados GNSS processados pelo método PPP. Nesse estudo foram empregadas estações pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), apresentando como vantagem a possibilidade da aplicação de controle de qualidade a partir dos resultados do ajustamento. Além disso, outras pesquisas visando comparar os resultados do PPP e do posicionamento relativo, para fins de monitoramento indicam que ambos os métodos apresentam resultados de acurácia no nível centimétrico, para a identificação de deslocamentos (ZANETTI; VEIGA; OLIVEIRA JÚNIOR, 2020).

Observando-se os estudos citados anteriormente, na literatura nacional e internacional, foi possível identificar a necessidade de mais pesquisas que evidenciem os limites do método PPP para fins de monitoramento de estruturas, trazendo maior segurança para sua aplicação. Tais estudos são ainda mais importantes, se considerarmos as modernizações cada vez mais frequentes na tecnologia GNSS, com a incorporação de novas constelações e novos sinais. Portanto, esse artigo científico tem como objetivo a análise do desempenho do posicionamento GNSS com o método PPP em ambiente

urbano controlado no monitoramento de estruturas, utilizando diferentes composições das constelações GNSS, bem como o uso de múltiplas constelações simultaneamente (MULTI-GNSS).

2. Metodologia

As atividades desenvolvidas neste trabalho estão ilustradas na Figura 1, a seguir, por meio de um fluxograma detalhado. Onde todas as fases do experimento, desde a construção do modelo físico de referência até a análise estatística dos dados processados são apresentadas. Esse esquema permite visualizar com clareza os procedimentos adotados para coleta, processamento e validação dos dados GNSS, além de evidenciar a ferramenta de análise estatística para a avaliação dos desafios e eficácia do posicionamento em ambiente urbano.

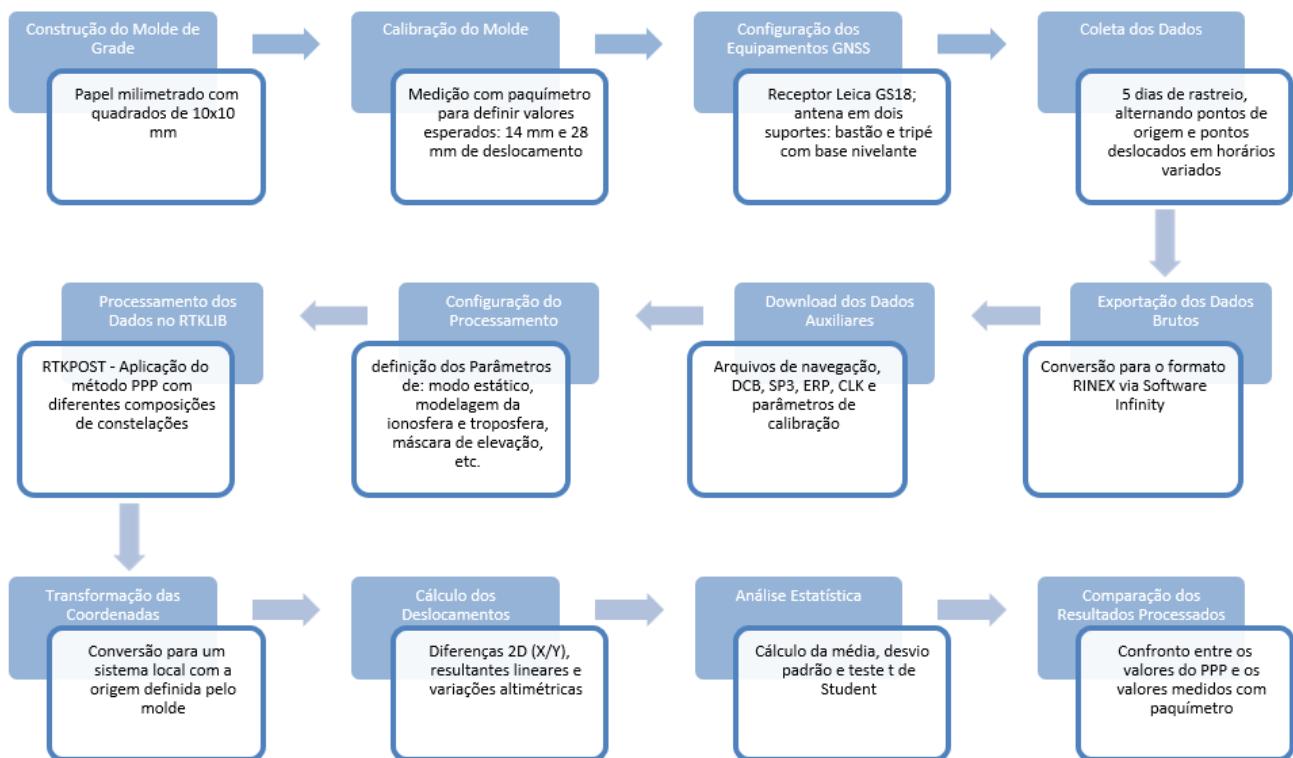


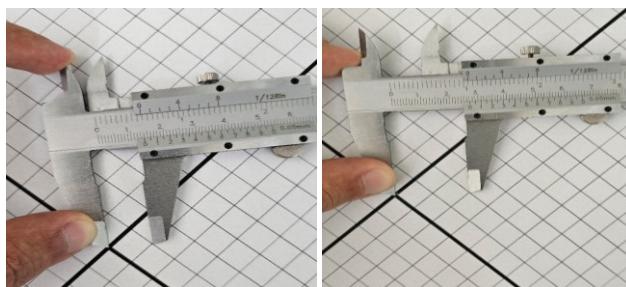
Figura 1 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.

Fonte: Os autores (2024).

A fim de construir as condições que permitissem avaliar o potencial de detecção de deslocamentos de coordenadas pelo posicionamento com a tecnologia GNSS, os testes foram realizados em ambiente controlado. O procedimento para controle de movimentação envolveu a criação de um molde em grade, o qual foi plotado, simulando uma superfície milimetrada espaçada por quadrados de 10 mm por 10 mm. Este molde foi fixado ao solo onde os rastreios foram realizados.

Os pontos a serem medidos foram definidos em relação à origem do molde em resultantes provenientes de movimentações de 10x10 mm e 20x20 mm, ou seja, o cruzamento das linhas do eixo central é a partida (origem) para a variação dos pontos medidos (deslocamentos).

O valor das resultantes encontradas por meio do cálculo das raízes quadradas das diferenças ao quadrado foi de 14 mm e 28 mm, para as movimentações citadas, de 10 e 20 mm, respectivamente. Buscando-se a calibração para controlar possíveis distorções nas impressões, o modelo foi medido três vezes em cada posição com um paquímetro como padrão na medida do quadriculado e as médias destas medições corresponderam aos valores das resultantes calculadas, como mostra a Figura 2.



*Figura 2 – Ponto deslocado a 14 e a 28 mm da origem.
Fonte: Os autores (2024).*

Os rastreios dos pontos por GNSS foram executados no prédio da Manfra, hoje sede da Empresa *Leica Geosystems* do Brasil, na cidade de Curitiba. A Figura 3 a seguir, mostra o mapa de localização.



*Figura 3 – Mapa de localização.
Fonte: Os autores (2024).*

O receptor GNSS utilizado foi o modelo GS18 da *Leica Geosystems*, tendo as seguintes características técnicas: precisão nominal (modo estático) de até 3 milímetros + 0,1 ppm (partes por milhão), na componente horizontal, e até 3,5 milímetros + 0,4 ppm na componente vertical; capacidade de combinar o uso das constelações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou/BDS; e registro de observáveis nas múltiplas frequências.

Ao todo, foram realizados 05 (cinco) dias de coleta entre os dias 79 e 83 do ano de 2023, onde os rastreios tiveram duração média de 2 horas cada, tendo início pôr volta das 9h da manhã e término entre 15h e 17h. Em cada um dos cinco dias de trabalho, de dois a três pares de pontos foram rastreados, sendo eles os pontos na origem do sistema (ponto central do papel milimetrado produzido) e pontos com deslocamento predefinidos (pontos com deslocamentos resultantes no papel milimetrado produzido). Ao total, no experimento de rastreio foram coletados 24 pontos.

Para a instalação das antenas GNSS nos pontos, utilizou-se um bastão apoiado por um bipé e um tripé com base nivelante. Onde a antena acoplada ao bastão foi utilizada para rastrear o ponto com um deslocamento definido de 14 mm em relação à origem do modelo (Figura 4). Enquanto o ponto rastreado com a antena acoplada à base nivelante e o tripé teve um deslocamento provocado de 28 mm em relação a origem do modelo.



Figura 4 – Ponto deslocado 10 mm da origem.

Fonte: Os autores (2024).

A fim de obter rastreios em condições semelhantes para todos os pontos levantados, o rastreio do ponto de origem e do ponto deslocado foram alternados ao longo dos dias. Ou seja, no primeiro dia, o ponto de origem foi rastreado pela manhã e o ponto deslocado foi rastreado à tarde. No segundo dia, o procedimento foi invertido, com o ponto deslocado sendo rastreado pela manhã e o ponto de origem à tarde.

Esse método de rastreio sistemático dos pontos por GNSS, alternando entre a origem e o ponto deslocado, permitiu a obtenção de dados em diversos períodos do dia, tornando as comparações consistentes para a realização de análises geodésicas posteriores. As antenas GS18 utilizadas, foram cedidas gratuitamente pela *Leica Geosystems* Brasil para a realização do experimento deste trabalho. O receptor foi configurado para coletar as constelações GPS, GLONASS, Galileo e Beidou, além das frequências L1, L2 e L5.

No contexto do processamento de dados GNSS, a conversão dos dados brutos para o formato RINEX desempenha um papel importante. O processo de conversão foi iniciado por meio da importação dos dados brutos no *software* comercial *Infinity*, versão 3.8, também disponibilizado para esta pesquisa de forma gratuita pela Leica Geosystems. No *Infinity* 3.8, configurou-se a exportação dos dados brutos para o formato RINEX, especificamente na versão RINEX 3.04. A escolha dessa versão deve-se ao fato de ser a última disponível no software e oferecer suporte para a exportação de observações de multi-constelações em um único arquivo.

Já no processo de obtenção dos dados precisos para o processamento, diversos arquivos são necessários para melhorar a precisão e a qualidade dos resultados. Inicialmente, foram obtidos os dados de navegação da Estação RBMC mais próxima, sendo ela a Estação da Universidade Federal do Paraná (UFPR), por meio do download dos arquivos RINEX 3 de 1 segundo disponibilizados no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esses arquivos, que são fornecidos por hora e a cada 15 minutos, foram baixados em todas as horas em que ocorreram os rastreios durante os dias de levantamento.

Além dos dados de navegação, outros produtos foram baixados do site do *Crustal Dynamics Data Information System* (CDDIS) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Foram obtidos os arquivos *Differential Code Bias* (DCB), que fornecem informações sobre os vieses diferenciais dos códigos dos satélites, melhorando a precisão do posicionamento.

Também foram baixados os arquivos *Satellite Precise Ephemeris* (SP3), contendo efemérides precisas dos satélites GNSS, essenciais para o cálculo das posições dos satélites no momento das observações. Os arquivos *Earth Rotation Parameters* (ERP) foram obtidos para fornecer informações sobre os parâmetros de correção da rotação da Terra durante o posicionamento. Por fim, os arquivos *Clock* (CLK) foram baixados para corrigir os erros de relógio dos satélites GNSS e melhorar a precisão temporal do posicionamento.

Além desses arquivos, também realizou-se o *download* do arquivo contendo os parâmetros de calibração da antena (GS18), referenciados ao último ITRF, no site da *National Geodetic Survey* (NGS). Esse arquivo contém informações sobre as antenas dos satélites e receptores GNSS. Estão inclusas informações relacionadas ao padrão de radiação (PCO e PCV), fator de calibração e *offset*, e é necessário para corrigir as características da antena durante o processamento dos dados.

A obtenção desses dados precisos é fundamental para garantir resultados de posicionamento GNSS confiáveis, integrando informações de navegação, efemérides, vieses diferenciais, parâmetros de rotação da Terra e erros de relógio.

Esses dados, juntamente com o arquivo de antena, são essenciais para o sucesso do processamento e a obtenção de resultados mais acurados.

Para o processamento dos dados brutos em si o software utilizado foi o RTKLIB, utilizando especificamente o módulo RTKPOST, que é projeto para processar e analisar os dados coletados por receptores GNSS de modo pós-processado. A Tabela 1 traz um resumo das principais configurações do processamento PPP descritos nesta seção.

Tabela 1 – Descrição da tabela.

Configurações RTKLIB	
Modo de posicionamento <i>(Positioning Mode)</i>	PPP estático (PPP Static)
Produtos (Efemérides e relógio) <i>Orbits and clocks</i>	CODE orbit and clock products
Modelagem dos efeitos da ionosfera <i>(Ionosphere)</i>	<i>Ionospheric-free</i>
Atraso troposférico zenital <i>(Zenith Tropospheric delay)</i>	<i>Estimate ZTD</i> (Componente hidrostática modelada e componente úmida residual estimada)
Máscara de Elevação <i>(Elevations mask)</i>	15°
Amostragem dos dados <i>(Sampling data)</i>	1 segundo
Filtragem <i>(Filter type)</i>	<i>Combined (Forward + Backward)</i>
Software	RTKlib 2.4.2

Fonte: Os autores (2024).

A solução resultante do processamento para ambos os métodos é fornecida no formato X/Y/Z-ECEF, que representa as coordenadas tridimensionais no sistema de coordenadas terrestre (ECEF - *Earth-Centered, Earth-Fixed*).

Foram utilizados os valores default propostos pelo RTKLIB, em relação às estatísticas e informações de precisões das observáveis para construção da matriz dos pesos bem como outros aspectos relacionados ao modelo estocástico. Isso significa que as estatísticas padrões do *software* são geradas para avaliar a qualidade e a precisão da solução de posicionamento obtida, fornecendo informações sobre os erros e a confiabilidade da solução (RTKLIB, 2021).

É importante ressaltar que o processamento dos dados pelo método PPP foi realizado de várias maneiras, com respeito ao uso das constelações GNSS. Foi realizado incluindo-se o MULTI-GNSS, que envolve a utilização das quatro principais constelações GNSS disponíveis (GPS, Glonass, Galileo e Beidou). Também, foram realizados processamentos específicos com pares de constelações (GPS + Glonass e GPS + Galileo) e processamentos individuais com cada constelação (GPS, Glonass, Galileo e Beidou).

Munido dos resultados dos processamentos a transformação das coordenadas foi realizada para permitir uma análise mais precisa das diferenças resultantes da movimentação controlada. Ao utilizar um sistema geodésico local, os dados podem ser avaliados em relação a uma referência específica, facilitando a interpretação dos resultados e fornecendo informações relevantes sobre a movimentação do ponto de interesse.

Com o intuito de facilitar a análise dos dados, as coordenadas cartesianas ortogonais geodésicas da origem do sistema foram definidas como sendo iguais às coordenadas da origem de cada molde. Em outras palavras, a coordenada local gerada pela transformação é igual à diferença das coordenadas em suas componentes.

Com o conjunto de diferenças lineares das coordenadas transformadas, foi calculado o estimador da média aritmética da resultante e o desvio padrão da amostra para o conjunto de pontos medidos com o bastão e os medidos com o Tripé. Estes dados estatísticos também foram calculados com os dados das altitudes, uma vez que ela não faz parte do afastamento linear dos pontos, mas é uma coordenada calculada pertencente a estes.

Estes resultados embasaram os cálculos para a prática do teste t de *Student* pareado, realizado em planilha eletrônica do Excel. Este teste foi escolhido por ser ideal para pequenas amostras e eficiente para realizar análises no quesito informações quantitativas de dados pareados. Ou seja, por meio dele será constatado se existe ou não diferenças

estatisticamente significativas entre as resultantes obtidas pelo cálculo das coordenadas dos rastreios GNSS multi-constelações e o valor de resultante medido com o paquímetro no modelo de grade.

3. Resultados e discussão

Uma vez que no cálculo das transformações as coordenadas cartesianas geodésicas da origem do sistema foram definidas como sendo iguais às coordenadas da origem de cada molde de grade, os valores de diferença são os resultados das transformações, ou seja, o valor das origens sempre será zero e as coordenadas obtidas no ponto de deslocamento já serão os valores de movimentações controladas.

A partir destes cálculos foi observado que os rastreios realizados no dia 3 formaram 2 pares de pontos para cada tipo de suporte utilizando a antena apoiada com tripé e base nívelante. E para o dia 5 os dados rastreados com tripé precisaram ser excluídos das observações, devido à inviabilidade dos seus resultados para as diferenças esperadas nesta pesquisa.

Logo, a partir dos demais valores das diferenças em cada componente horizontal das coordenadas dos pontos, foi possível calcular os valores de resultante linear (2D) para cada ponto medido.

Os resultados provenientes destes cálculos para a determinação das resultantes lineares, está disposto na Tabela 2 para cada dia, para cada constelação utilizada e dividido por instrumentos de suporte para coleta (bastão ou tripé com base nívelante).

Tabela 2 – Dados armazenados das resultantes 2D calculadas em mm.

	MULTI-GNSS	GPS	GPS+GLONASS	GPS+GALIEO	Instrumento de suporte + valor esperado de movimentação
Dia 1	39	29	13	24	Bastão 14 mm
Dia 2	50	142	165	24	
Dia 3	28	41	16	18	
Dia 4	11	102	4	41	
Dia 5	26	17	28	26	
Dia 1	56	43	52	59	Tripé 28mm
Dia 2	29	30	41	27	
Dia 3	40	21	68	32	
Dia 4	22	102	22	19	

Fonte: Os autores (2024).

Para a validação dos resultados foram calculadas as médias das resultantes partindo do conjunto de dados obtidos anteriormente, a seguir está disposto na Figura 5, as médias das resultantes para cada combinação de constelações GNSS.

Médias das resultantes 2D para cada combinação GNSS

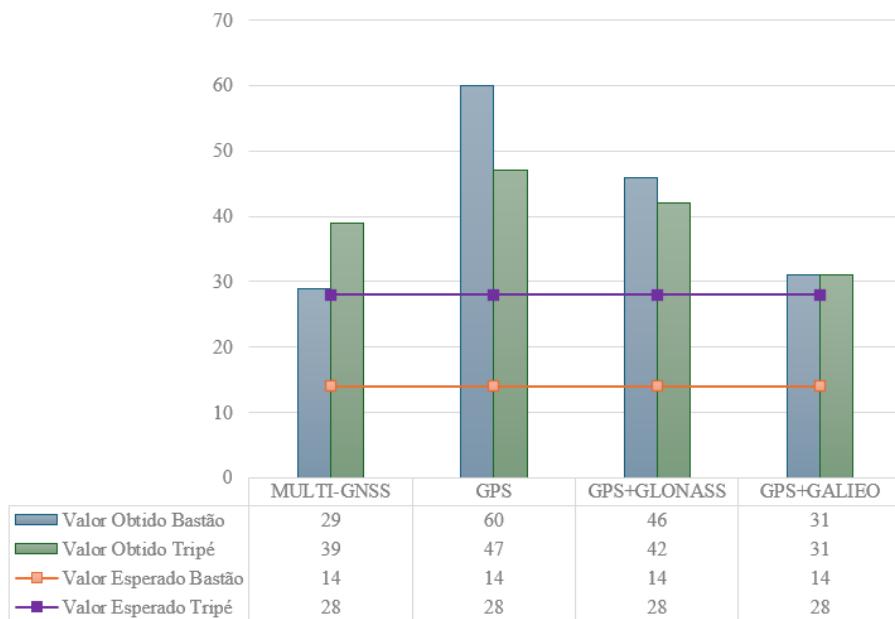


Figura 5 – Médias das resultantes 2D para cada combinação GNSS.

Fonte: Os autores (2024).

Como pode ser observado no gráfico e com base nos referidos valores, somente as médias de menor magnitude, ou seja, as que mais se aproximaram dos valores de movimentação esperado foram selecionadas para o emprego do teste t. Especificamente, a combinação MULTI-GNSS (GPS + GLONASS + GALILEO + BEIDOU) e GPS + GALILEO foram as escolhidas para a aplicação do referido teste, onde assumiu-se uma média esperada de 14 mm, um nível de significância de 95% e tendo 5 graus de liberdade. Na Tabela 3 são apresentados os resultados encontrados para o conjunto de pontos medidos com o bastão.

Tabela 3 – Conjunto de dados das resultantes 2D medido com bastão.

Conjunto Medido	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	T _{TABELADO}	T _{CALCULADO}
MULTI-GNSS	29	14	2,571	2,642
GPS+GALILEO	31	14	2,571	2,642

Fonte: Os autores (2024).

Realizando as análises pertinentes a esses testes, foi possível observar que os valores de T_{cálculado} são maiores que os de T_{tabelado}, logo rejeita-se a hipótese nula para ambos os conjuntos de pontos. Ou seja, constatou-se a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as resultantes obtidas pelo cálculo das coordenadas dos rastreios GNSS MULTI-GNSS e a combinação GPS+GALILEO, em comparação com o valor da resultante medida no modelo de grade com bastão. A Tabela 4 a seguir, apresenta os resultados encontrados para o conjunto de pontos medidos com o tripé.

Tabela 4 – Conjunto de dados das resultantes 2D medido com tripé.

Conjunto Medido	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	T _{TABELADO}	T _{CALCULADO}
MULTI-GNSS	39	14	2,776	1,822
GPS+GALILEO	31	17	2,776	0,402

Fonte: Os autores (2024).

Já neste caso foi possível observar que os valores de $T_{calculado}$ são menores que os de $T_{tabelado}$, logo aceita-se a hipótese nula. Ou seja, constatou-se a não existência de diferenças estatisticamente significativas entre as resultantes obtidas pelo cálculo das coordenadas dos rastreios GNSS MULTI-GNSS e a combinação GPS+GALILEO, em comparação com o valor da resultante medido no modelo de grade com o tripé.

Já os valores das diferenças das altitudes, também não precisaram ser necessariamente calculados, pois a transformação das coordenadas já apresenta suas diferenças. Estes valores das diferenças de níveis dos pontos em cada dia, para cada constelação utilizada e divididos por instrumentos de suporte para coleta (bastão ou tripé com base nívelante) estão dispostos na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Dados armazenados das diferenças de altitudes (H) em mm.

	MULTI-GNSS	GPS	GPS+GLONASS	GPS+GALIEO	Instrumento de suporte + valor esperado de movimentação
Dia 1	8	48	49	15	Bastão 0 mm
Dia 2	16	72	40	29	
Dia 3	4	55	74	48	
Dia 4	17	63	9	9	
Dia 5	54	121	55	81	
Dia 1	49	8	58	35	Tripé 0mm
Dia 2	65	85	37	52	
Dia 3	41	60	80	65	
Dia 4	16	27	46	53	

Fonte: Os autores (2024).

O teste estatístico também foi aplicado com os dados das altitudes, uma vez que ela não faz parte do afastamento linear dos pontos, mas é uma coordenada calculada pertencente a estes. Na Tabela 6 a seguir, estão as médias das diferenças de níveis para cada combinação de constelações GNSS.

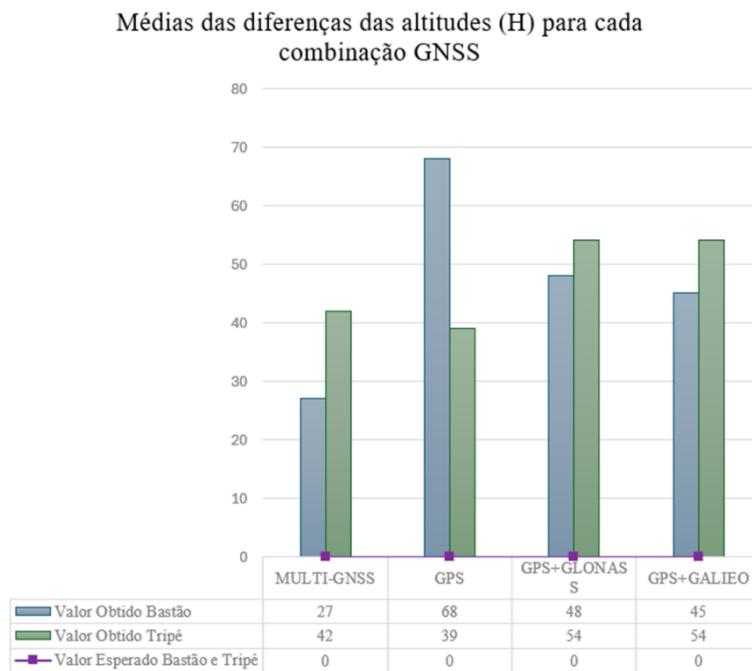


Figura 6 – Médias das diferenças das altitudes (H) para cada combinação GNSS.

Fonte: Os autores (2024).

Também com base nos referidos valores de média, somente a de menor magnitude foi selecionada para o emprego do teste t. Ou seja, especificamente a combinação MULTI-GNSS. Assumindo 0 mm de média esperada e adotando nível de significância de 95%, com 5 graus de liberdade foi realizado o teste e seus resultados são apresentados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Conjunto de dados das diferenças de altitude da combinação MULTI-GNSS.

Instrumento	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	T _{TABELADO}	T _{CALCULADO}
Bastão	27	23	2,571	2,858
Tripé	42	16	2,571	6,050

Fonte: Os autores (2024).

Logo, constata-se com tal resultado que se rejeita-se a hipótese nula para os 2 tipos de rastreio (bastão e tripé), ou seja, para os dados altimétricos da amostra há diferenças estatisticamente significativas em suas medidas obtidas nos processamentos de dados GNSS.

4. Considerações finais

A partir da análise experimental conduzida em ambiente urbano controlado, torna-se evidente que o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), quando aliado ao uso de múltiplas constelações GNSS, representa um caminho viável e promissor para o monitoramento geodésico de estruturas. Embora os resultados obtidos ainda apresentem limitações em relação à precisão esperada — especialmente quando comparados aos métodos relativos —, os testes estatísticos realizados indicam que, em certas configurações, as diferenças entre os valores medidos e os esperados não são estatisticamente significativas. Tal constatação valida a aplicabilidade do método PPP com múltiplas constelações como alternativa eficiente e simplificada, principalmente em cenários onde a implantação de infraestruturas de referência não é viável.

Os resultados obtidos neste estudo mostram que ao se comparar os resultados da combinação MULTI-GNSS com aqueles obtidos por meio da combinação GPS + Galileo, observa-se que esta última apresentou desempenhos estatisticamente semelhantes, e, em alguns casos, comparáveis quanto à precisão horizontal esperada.

A análise estatística demonstrou que, para o conjunto de dados coletados com o tripé, não houve diferenças significativas entre as resultantes esperadas e as observadas, tanto no cenário MULTI-GNSS quanto na combinação GPS + Galileo. Esse fato sugere que, sob determinadas condições e com uso de suportes estáveis, a combinação GPS + Galileo pode oferecer resultados compatíveis com soluções mais complexas e densas, como as obtidas via MULTI-GNSS.

Por outro lado, nos rastreios realizados com bastão, ambas as configurações apresentaram discrepâncias significativas em relação aos valores de deslocamento esperado, apontando para a influência do tipo de suporte e da estabilidade da estação na acurácia do método. Além disso, as variações detectadas nas componentes verticais (altitudes) indicam que, independentemente da configuração de constelações empregada, ainda são necessários aprimoramentos nos modelos de correção e nos parâmetros de calibração para que o PPP alcance um desempenho altimétrico mais confiável.

Dessa forma, conclui-se que tanto a abordagem MULTI-GNSS quanto a combinação GPS + Galileo apresentam potencial para aplicação em monitoramento de estruturas urbanas, sendo a escolha entre elas dependente do contexto operacional, da infraestrutura disponível e dos objetivos de precisão estabelecidos. Reforça-se, assim, a importância da continuidade de pesquisas voltadas à otimização do PPP, com foco na integração inteligente de constelações, no refinamento dos modelos de erro e no desenvolvimento de soluções práticas para a engenharia aplicada.

Agradecimentos

Quero expressar minha imensa gratidão a Leica Geosystems, pois sua generosidade ao fornecer os equipamentos e softwares que utilizei nesta pesquisa foi essencial para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus orientadores, sou profundamente grato. A sabedoria, experiência e orientações valiosas foram fundamentais para o êxito desta empreitada. Agradeço por compartilharem seus conhecimentos e dedicarem tempo e esforço para me guiar.

Por último, mas não menos importante, quero estender meu agradecimento à Universidade Federal do Paraná. Em especial, ao corpo docente da Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que demonstrou um comprometimento excepcional com a qualidade e excelência do ensino.

Referências

- Caldas, F. L.; Chaves, J. C. Determinação do modelo de deformação da rede GNSS/SP com base na teoria da elasticidade. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 1, p. 71-82, 2014.
- Chaves, J. C.; Segantine, P. C. L. Determinação de Parâmetros de Deformação com GPS. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, n. 6, p. 1305-1314, 2014.
- Collischonn, C.; Matsuoka, M. T. Proposta de Método de Rede GNSS por PPP e Análise de Confiabilidade. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, n. 3, p. 453–471, 2016.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo*. <https://bit.ly/3x4I0J8>. 2021.
- Lin, C. et al. Application of Multi-System Combination Precise Point Positioning in Landslide Monitoring. *Applied Sciences*, v. 11, n. 18, p. 8378, 2021.
- Monico, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS - Descrição, fundamentos e aplicações*. 2a edição ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008.
- Oliveira JR, P. S. *Influência da Estimativa do Gradiente Horizontal Troposférico no Posicionamento GNSS de Alta Acurácia*. 2015. 76 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2015.

Oliveira JR, P. S. *Definition and Implementation of a New Service for Precise GNSS Positioning*. 2017. 250 f. Tese (doutorado) – CNAM e Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2017.

RTKLIB. RTKLIB 2.4.2 manual. 2021.

Song, J.; Zhao, L. Comparison Analysis on the Accuracy of Galileo PPP Using Different Frequency Combinations in Europe. *Applied Sciences*, v. 11, n. 21, p. 10020, 2021.

Teunissen, P.; Montenbruck, O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. [S.l.]: Springer, 2017.

Wübbena, G.; Schmitz, M.; Bagge, A. PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks. In: *Proceedings of the 18th international technical meeting of the satellite division of the Institute of navigation (ION GNSS 2005)*. p. 2584-2594. 2005.

Zanetti, G. Z.; Veiga, L. A. K.; Oliveira Júnior, P. S.. Monitoramento Estrutural por GNSS: Análise do PPP e Posicionamento Relativo na UHE Mauá. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 43, n. 3, 2020.