

POSICIONAMENTO MULTI-CONSTELAÇÕES COM O SISTEMA DE PROCESSAMENTO CENTERPOINT RTX

Multi-Constellation Positioning with the Centerpoint RTX Processing System

Marcos Filipe Vieira Ribas
Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia Civil – Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica
E-mail: marcos.ribas@ufv.br

Rafael Grupioni Rezende
Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia Civil – Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica
E-mail: rafael.grupioni@ufv.br

William Rodrigo Dal Poz
Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia Civil – Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica
E-mail: william.dalpoz@ufv.br

Paulo Augusto Ferreira Borges
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais
Setor de Agrimensura e Cartografia
E-mail: paulo.borges@ifsuldeminas.edu.br

Resumo:

Atualmente tem se tornado comum a utilização de sistemas online e gratuitos para processamento de dados GNSS, onde no Brasil destaca-se o uso do IBGE-PPP, que processa dados GPS e GLONASS. Outra opção disponível é o CPR (CenterPoint RTX), que permite o processamento multi-constelações (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou/BDS). Este trabalho avaliou a qualidade posicional do pós-processamento multi-constelações no software CPR, contemplando a influência do Galileo e do BDS em diferentes intervalos de rastreamento (15, 30, 60 e 90 minutos). Para análise dos resultados, comparou-se o desempenho do CPR com o IBGE-PPP, utilizando-se dados GNSS de janeiro de 2022 em três estações (VICO, RJNI e SJSP) da RBMC. Estimou-se as discrepâncias cartesianas resultantes (X, Y, Z) entre as coordenadas obtidas pelos dois serviços e as coordenadas oficiais da RBMC, em SIRGAS2000, época 2000,4. Para isso, realizou-se a compatibilização de referencial e época das coordenadas estimadas pelo CPR. Nas estações VICO e RJNI constatou-se melhora significativa do processamento multi-constelações com o CPR em relação ao IBGE-PPP, obtendo-se RMS e desvio padrão das discrepâncias resultantes com 15 minutos de rastreamento ao nível centimétrico, enquanto o IBGE-PPP proporcionou valores na ordem do decímetro. Nessas estações os resultados CPR com 15 minutos de rastreamento foram melhores que o IBGE-PPP com 30 minutos. Contudo, na estação SJSP o posicionamento multi-constelações CPR não proporcionou melhora nos resultados. Não obteve-se também melhorias com uso da constelação BDS. Com os dados Galileo os resultados melhoraram de forma significativa (de 3 a 4 vezes) nas estações VICO e RJNI.

Palavras-chave: GNSS, Trimble Center Point, Serviços on-line GNSS.

Abstract:

The employment of online platforms for GNSS data processing has become common nowadays, with IBGE-PPP, which processes GPS and GLONASS data, standing out in Brazil. Another option is CPR (CenterPoint RTX), which allows multi-constellation processing (GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou/BDS). This work evaluated the positional quality of multi-constellation post-processing in the CPR software, considering the influence of Galileo and BDS at different tracking intervals (15, 30, 60, and 90 minutes). To analyze the results, the performance of CPR was compared with IBGE-PPP, using GNSS data from January 2022 at three stations (VICO, RJNI, and SJSP) of RBMC. The resulting Cartesian discrepancies (X, Y, Z) between the coordinates obtained by the two services and the official RBMC coordinates were estimated in SIRGAS2000, epoch 2000.4. For this, the reference frame and epoch of the coordinates estimated by the CPR were matched. At the VICO and RJNI stations, a significant improvement was observed in the multi-constellation processing with the CPR about the IBGE-PPP, obtaining RMS and standard deviation of the resulting discrepancies with 15 minutes of tracking at the centimeter level, while the IBGE-PPP provided values in the order of decimeters. At these stations, the CPR outcomes with 15 monitoring minutes were superior to the IBGE-PPP with 30 minutes. However, at the SJSP, the CPR multi-constellation localization did not produce any improvement in the results. No progress was attained with the application of the BDS constellation either. With Galileo data, the results enhanced significantly (3 to 4 times) at VICO and RJNI stations.

Keywords: GNSS, Trimble Center Point, Online GNSS Services.

1 INTRODUÇÃO

Há diferentes serviços de processamento de dados GNSS online e gratuitos. No Brasil o serviço gratuito online mais utilizado pelos usuários é o IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), que proporciona suporte para processamento de dados dos sistemas GPS e/ou GLONASS. Nesse serviço o usuário precisa fornecer os dados de apenas um receptor GNSS. Este sistema permite obter coordenadas no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) e no ITRF (International Terrestrial Reference Frame) (IBGE-PPP, 2020). Foi concebido através da parceria entre a Coordenação de Geodésia do IBGE e o CGS (Canadian Geodetic Survey) do NRCan (Natural Resources Canada), e faz uso do software GPSPACE, bem como das órbitas precisas do CGS. A versão atual do PPP-NRCan é disponibilizada no seguinte endereço eletrônico: <https://webapp.csr-scrs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.

É importante destacar que as versões atuais do IBGE-PPP e do PPP-NRCan não são as mesmas. Enquanto o IBGE-PPP não soluciona a ambiguidade como números inteiros, o PPP-NRCan considera a solução da ambiguidade (PPP-AR - Ambiguity Resolution). Tem-se também outros serviços de posicionamento online e gratuitos, tais como o GAPS-PPP (GNSS Analysis and Positioning Software), o APPS (Automatic Precise Positioning Service) e o Magic GNSS. O GAPS-PPP processa dados das constelações GPS, Galileo e BDS (multi-constelações) (GAPS, 2022).

O termo multi-constelações tem sido adotado com adição de dados das constelações Galileo e BDS no processamento dos dados GNSS. Este serviço de posicionamento é disponibilizado pela UNB (University of the New Brunswick) no seguinte endereço eletrônico: <http://gaps.gge.unb.ca/>. O APPS é disponibilizado no seguinte endereço eletrônico: <https://pppx.gdgps.net/>. Este serviço de posicionamento processa somente dados da constelação GPS. O Magic GNSS foi desenvolvido pela GMV Innovation Solutions e é disponibilizado no seguinte endereço eletrônico: <https://magicgnss.gmv.com/>. Este serviço online PPP não permite o processamento gratuito de dados multi-constelações (GPS, GLONASS, Galileo e BDS). Contudo, para usuários registrados (e-mail e senha) pode-se processar dados das constelações GPS e GLONASS. Além dos serviços online PPP gratuitos tem-se também o sistema de posicionamento relativo em rede

AUSPOS (Online GPS Processing Service), mantido pelo governo australiano. Tal sistema usa a rede IGS (International GNSS Service), que possui mais de 500 estações espalhadas pelo mundo, possibilitando aplicação do posicionamento relativo em rede, no entanto, essa plataforma processa apenas dados GPS (GA, 2022). O serviço é disponibilizado no seguinte endereço eletrônico: <https://gnss.ga.gov.au/auspos>.

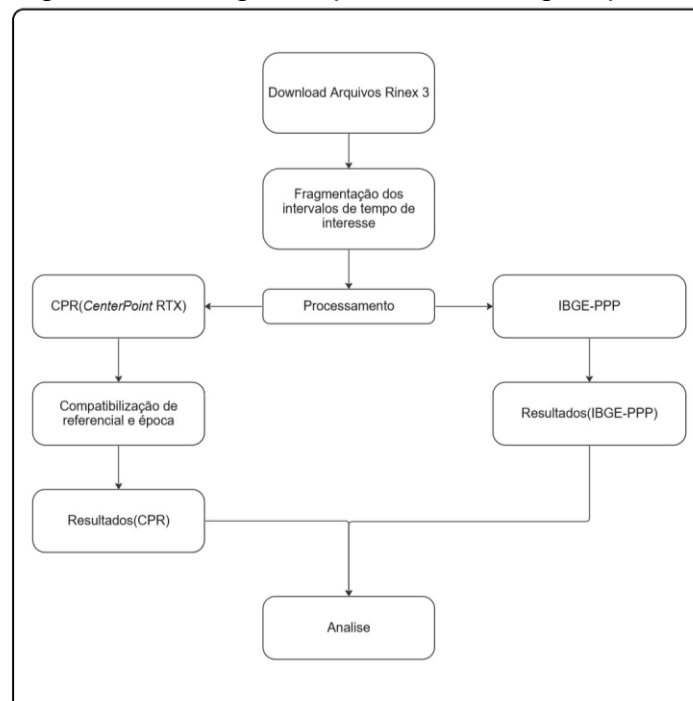
Outro serviço de processamento online, também livre, é oferecido pela empresa americana Trimble. Trata-se do serviço de pós-processamento denominado CPR (CenterPoint RTX). Segundo NARDO (2015) este sistema transmite correções de órbita e relógio de satélite para os receptores dos clientes (ou para uso do CPR), que realizam uma estimativa de posição semelhante ao PPP. Um diferencial deste serviço, em comparação com o IBGE-PPP, PPP-NRCan, GAPS, APPS, Magic GNSS e AUSPOS é a capacidade de processamento de dados multi-constelações, considerando todas as constelações globais (GPS, GLONASS, Galileo e BDS). Destaca-se que o BDS completou sua constelação em 2020 e o Galileo está em fase de conclusão (INSIDE GNSS, 2020). O serviço de processamento CPR é disponibilizado no seguinte endereço eletrônico: <https://trimblertx.com/UploadForm.aspx>.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho consiste em realizar uma análise estatística do serviço de pós-processamento online e gratuito CPR, considerando a influência das diferentes constelações GNSS e intervalos de coleta na qualidade posicional dos resultados obtidos, avaliando-se os resultados em comparação àquels obtidos no processamento pelo IBGE-PPP.

2 METODOLOGIA

A Metodologia aplicada neste trabalho pode ser representada pelo fluxograma a da Figura 1.

Figura 1 : Fluxograma para metodologia aplicada.



Fonte: Autores (2024).

Inicialmente foi realizado o download dos dados no formato RINEX 3.02

(compactado em formato Hatanaka - Hatanaka-compressed format) das 3 estações da RBMC. Os dados Hatanaka foram descompactados usando o software crx2mx, obtendo como resultado dados no formato RINEX 3.02 original (descompactado).

De posse dos arquivos RINEX, foi usado a extensão RTKconv do software RTKlib para fazer a fragmentação dos intervalos de interesse, entre 11:00 e 12:30 UTC de cada dia. Quatro intervalos foram definidos: 15, 30, 60 e 90 minutos. Os processamentos também foram realizados com diferentes constelações GNSS, englobando a tradicional integração GPS e GLONASS e com adição das constelações Galileo e BDS.

Na tabela 1 são ilustradas as diferentes estratégias de processamento que foram adotadas. As siglas G, R, E, e C representam as constelações GPS, GLONASS, Galileo e BDS, respectivamente. Também são ilustradas as quantidades de processamentos considerando uma estação da RBMC. Como foram utilizados dados de 3 estações, no total, foram realizados 1488 processamentos (496*3) no CPR.

Tabela 1: Estratégias e quantidades de processamentos.

Tempo de coleta (min)	Sistemas GNSS				Total de processamentos
	G+R	G+R+E	G+R+C	G+R+E+C	
15	31	31	31	31	124
30	31	31	31	31	124
60	31	31	31	31	124
90	31	31	31	31	124
Total de processamentos para cada estação =					496

Fonte: Autores (2024).

No caso do IBGE-PPP os dados foram processados somente considerando as constelações GPS e GLONASS, visto que a versão atual do programa não suporta dados das constelações Galileo e BDS. Desta forma, foram realizados mais 372 processamentos no IBGE-PPP (124 x 3 estações). Assim, no total, foram realizados 1860 processamentos.

Os resultados são obtidos em duas épocas diferentes no referencial ITRF 2014. Os valores em ITRF2014 época 2010,0 foram usados neste trabalho, sendo que passaram por devida conversão de referencial (para ITRF2000/SIRGAS2000) e atualização de época para 2000,4 (época das coordenadas SIRGAS2000). No processo de compatibilização de referencial foi adotada a compatibilidade entre o SIRGAS2000 e o ITRF2000 (WESTON e SOLER, 2012).

Para atualização de coordenadas (2010 para 2000,4) foram utilizadas as velocidades fornecidas pelo software VEMOS2009. A utilização do software consiste em entrar com as coordenadas geodésicas do ponto de interesse no formato de graus decimais.

A tabela 2 mostra as velocidades estimadas das 3 estações da RBMC, com as quais utiliza-se o serviço online ECTT para transformar as coordenadas estimadas pelo sistema CPR em ITRF2014, época 2010,00 para o referencial ITRF2000/SIRGAS2000, época 2000,4. Para realizar a transformação de referencial o serviço ECTT utiliza os parâmetros de Helmert e suas variações estimados e disponibilizados pelo IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière), no seguinte endereço eletrônico: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>.

Tabela 2: Velocidades estimadas pelo software Vemos2009.

Velocidades Calculadas			
Estações	Vx(m/ano)	Vy(m/ano)	Vz(m/ano)
VICO	0,0008	-0,0056	0,0155
RJNI	0,0007	-0,0060	0,0109
SJSP	0,0008	-0,0056	0,0107

Fonte: Autores (2024).

Os resultados obtidos pelo CPR também foram comparados com os resultados fornecidos pelo IBGE-PPP. Assim, foram realizados os mesmos processamentos, considerando os mesmos intervalos de coleta de dados definidos na Tabela 1. Contudo, no IBGE-PPP foram processados os dados somente com uma configuração de constelações GNSS: GPS e GLONASS, visto que o IBGE-PPP não processa dados das constelações Galileo e BDS.

Desta forma, as quatro estratégias de processamento definidas na tabela 2 (G+R, G+R+E, G+R+C e G+R+E+C) foram comparadas com uma estratégia de processamento realizado com o IBGE-PPP (GPS+GLONASS). Com isso, foi possível realizar análises comparativas sobre a contribuição das constelações Galileo e BDS.

Importante destacar que o IBGE-PPP já fornece as coordenadas em SIRGAS2000, época 2000,4. Assim, todas as coordenadas estimadas pelos dois sistemas online de processamento podem ser comparadas com as fornecidas pelos descritivos disponibilizados pelo IBGE (SIRGAS2000, época 2000,4).

Após o processamento dos dados e tabulação de todos os resultados no mesmo referencial (SIRGAS2000), e época, (2000,4), foram realizadas as análises estatísticas. A tabulação compreende as coordenadas cartesianas estimadas (X, Y, Z) pelos dois sistemas de posicionamento online.

Primeiramente foram calculadas as discrepâncias 3D, para todos os 31 dias em cada intervalo de coleta definido (15, 30, 60 e 90 minutos), para cada estação da RBMC e combinações de constelações GNSS. Para isso foi usada a equação (1):

$$D_{3D} = \sqrt{(X_{Calc} - X_{ref})^2 + (Y_{Calc} - Y_{ref})^2 + (Z_{Calc} - Z_{ref})^2} \quad (1)$$

Em que:

D_{3D} : Discrepância 3D.

$(X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref})$: Coordenadas de referência do descritivo da RBMC fornecidas pelo IBGE (SIRGAS2000, época 2000,4).

$(X_{Calc}, Y_{Calc}, Z_{Calc})$: Coordenadas da RBMC estimadas pelo CPR e IBGE-PPP (SIRGAS2000, época 2000,4).

O RMS 3D foi calculado segundo a equação (2).

$$RMS_{3D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{3D_i})^2}{n}} \quad (2)$$

Em que:

n: Número de dias de processamento, 31 dias.

D_{3D_i} : Discrepância 3D no dia "i".

Foi necessário calcular os resíduos, pela equação (3).

$$Res_{3D} = \sqrt{(X_{CALC} - \underline{X})^2 + (Y_{CALC} - \underline{Y})^2 + (Z_{CALC} - \underline{Z})^2} \quad (3)$$

onde:

$(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$: Média de 31 dias das coordenadas da RBMC calculadas pelo CPR e IBGE-PPP.

Assim, a partir dos resíduos calculados com a equação (3), calculou-se o desvio padrão através da equação (4).

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Res_{3D_i})^2}{n-1}} \quad (4)$$

onde:

n: Número de dias de processamento, 31 dias.

Res_{3D_i} : Resíduo 3D no dia "i".

Os resultados são apresentados no tópico seguinte em forma de tabelas e gráficos para facilitar as análises e comparações.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente foram apresentadas tabelas ilustrando os valores máximos (Max) e mínimos (Min), RMS e o desvio padrão (DESVIO) das discrepâncias tridimensionais.

Na tabela 3, considerando a integração clássica GPS e GLONASS, para intervalos de 15 minutos, os valores máximos de discrepância obtidos com o CPR foram piores para todas as estações. No caso da estação RJNI o valor máximo foi 2,7 vezes maior. Na estação VICO, o valor máximo atingiu 0,759m, enquanto nos resultados IBGE-PPP o maior valor atingiu 0,434m. Em contrapartida, os valores mínimos de discrepâncias foram similares para ambos os sistemas de processamento.

Tabela 3: Comparação das discrepâncias 3D, RMS e Desvio, entre IBGE-PPP (GPS/ GLONASS) e Trimble CPR (GPS/ GLONASS).

Tempo (minutos)	Estação	IBGE-PPP				CPR			
		Discrepâncias 3D		RMS(m)	DESVIO(m)	Discrepâncias 3D		RMS(m)	DESVIO(m)
		Min(m)	Max(m)			Min(m)	Max(m)		
15	VICO	0,029	0,434	0,157	0,158	0,024	0,759	0,197	0,185
30		0,028	0,175	0,083	0,081	0,015	0,105	0,037	0,031
60		0,020	0,075	0,048	0,038	0,015	0,039	0,024	0,016
90		0,012	0,051	0,037	0,026	0,014	0,043	0,022	0,014
15	RJNI	0,022	0,265	0,129	0,126	0,031	0,730	0,153	0,154
30		0,014	0,124	0,068	0,056	0,027	0,078	0,051	0,017
60		0,012	0,102	0,049	0,032	0,039	0,092	0,058	0,015
90		0,020	0,112	0,056	0,033	0,039	0,091	0,060	0,013
15	SJSP	0,031	0,275	0,127	0,125	-0,082	0,388	0,187	0,157
30		0,022	0,211	0,073	0,066	0,013	0,163	0,082	0,068
60		0,017	0,156	0,071	0,056	0,034	0,160	0,072	0,044
90		0,026	0,124	0,062	0,043	0,040	0,173	0,072	0,047

Fonte: Autores (2024).

Com intervalos de 30, 60 e 90 minutos, nas estações VICO e RJNI o CPR proporcionou os menores valores máximos. O mesmo não ocorreu na estação SJSP, contudo os valores são similares.

Os resultados CPR para RMS e Desvio com 15 minutos foram piores que o IBGE-PPP. A partir de 30 minutos nas estações VICO e RJNI o CPR apresenta desvio e RMS melhores que o IBGE-PPP, enquanto na estação SJSP os valores foram similares.

A seguir é apresentado na tabela 4 a adição dos satélites BDS. Os valores de RMS, desvios e discrepâncias apresentaram comportamentos semelhantes aos

encontrados na tabela 3, dessa forma, entende-se que a contribuição do sistema BDS não foi significativa.

Tabela 4: Comparação das discrepâncias 3D, RMS e Desvio Padrão, entre IBGE-PPP (GPS/ GLONASS) e Trimble CPR (GPS/ GLONASS/ BDS).

Tempo (minutos)	Estação	IBGE-PPP				CPR			
		Discrepâncias 3D		RMS(m)	DESVIO(m)	Discrepâncias 3D		RMS(m)	DESVIO(m)
		Min(m)	Max(m)			Min(m)	Max(m)		
15	VICO	0,029	0,434	0,157	0,158	0,022	0,759	0,193	0,182
30		0,028	0,175	0,083	0,081	0,014	0,105	0,038	0,032
60		0,020	0,075	0,048	0,038	0,014	0,039	0,024	0,016
90		0,012	0,051	0,037	0,026	0,014	0,039	0,022	0,014
15	RJNI	0,022	0,265	0,129	0,126	0,02	0,73	0,151	0,152
30		0,014	0,124	0,068	0,056	0,027	0,079	0,051	0,017
60		0,012	0,102	0,049	0,032	0,04	0,092	0,058	0,015
90		0,020	0,112	0,056	0,033	0,04	0,093	0,060	0,013
15	SJSP	0,031	0,275	0,127	0,125	0,058	0,388	0,191	0,158
30		0,022	0,211	0,073	0,066	0,016	0,163	0,080	0,067
60		0,017	0,156	0,071	0,056	0,016	0,179	0,073	0,051
90		0,026	0,124	0,062	0,043	0,04	0,118	0,067	0,032

Fonte: Autores (2024).

Vale ressaltar que dos 31 dias de coleta, observações dos satélites BDS estiveram disponíveis no processamento em apenas 14 dias na estação RJNI, 13 dias na estação VICO e 12 dias na estação SJSP, e em alguns casos aparecem apenas após 60 minutos de coleta.

Além disso, quando presentes, poucos satélites da constelação BDS são utilizados no processamento dos dados no CPR. No máximo, observações de apenas 3 satélites são utilizados no processamento. Conforme já mencionado, em vários processamentos nenhum satélite é rastreado. Em alguns dias apenas 2 satélites são observados. Nos apêndices 1,2 e 3 são mostrados os números de satélites de todas as constelações que participaram no processamento dos dados em cada estação.

Apesar da constelação BDS estar completa, vários problemas ainda ocorrem com o rastreamento da constelação de satélites BDS-3 (satélites MEO – Medium Earth Orbit). Isso ocorre principalmente devido à limitação de canais de rastreamento ou firmware desatualizado. Além disso, apesar de uma ampla gama de frequências e sinais transmitidos pelos satélites BDS-3, nem todos são suportados pelos receptores (ZAJDEL et al., 2022). Diante do exposto, verifica-se a alta similaridade entre os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Na tabela 5, com adição do sistema Galileo aos tradicionais GPS e GLONASS, as discrepâncias máximas foram menores com o CPR em todos os casos, exceto na estação SJSP no intervalo de 15 e 60 minutos. Os desvios CPR são sempre centimétricos e melhores que o IBGE-PPP, exceto na estação SJSP com intervalo de 15 minutos, sendo que em alguns casos é 3 e até 4 vezes melhor, como acontece na estação VICO com intervalo de 30 minutos.

O RMS para o sistema CPR apresenta resultados melhores nas estações VICO e RJNI, sendo até 2,8 vezes melhor, como acontece na estação VICO com intervalo de 30 minutos. Somente no intervalo de 60 minutos na estação RJNI o IBGE-PPP apresenta RMS melhor. Na estação SJSP os valores de RMS são similares, porém, apenas com 15 minutos o IBGE-PPP apresenta vantagem significativa.

Tabela 5: Comparação das discrepâncias 3D, RMS e Desvio Padrão, entre IBGE-PPP (GPS/ GLONASS) e Trimble CPR (GPS/ GLONASS/ Galileo).

Tempo (minutos)	Estação	IBGE-PPP				CPR			
		Discrepâncias 3D		RMS(m)	DESVIO(m)	Discrepâncias 3D		RMS(m)	DESVIO(m)
		Min(m)	Max(m)			Min(m)	Max(m)		
15	VICO	0,029	0,434	0,157	0,158	0,013	0,296	0,085	0,076
30		0,028	0,175	0,083	0,081	0,014	0,051	0,029	0,019
60		0,020	0,075	0,048	0,038	0,013	0,034	0,023	0,014
90		0,012	0,051	0,037	0,026	0,012	0,033	0,021	0,012
15	RJNI	0,022	0,265	0,129	0,126	0,026	0,083	0,055	0,037
30		0,014	0,124	0,068	0,056	0,025	0,087	0,051	0,019
60		0,012	0,102	0,049	0,032	0,035	0,075	0,053	0,013
90		0,020	0,112	0,056	0,033	0,040	0,075	0,054	0,011
15	SJSP	0,031	0,275	0,127	0,125	0,039	0,377	0,164	0,134
30		0,022	0,211	0,073	0,066	0,015	0,147	0,070	0,057
60		0,017	0,156	0,071	0,056	0,037	0,161	0,069	0,039
90		0,026	0,124	0,062	0,043	0,036	0,102	0,062	0,026

Fonte: Autores (2024).

A tabela 6 mostra os resultados dos processamento CPR com todas as constelações. Os resultados são muito semelhantes aos apresentados na tabela 6, tendo em vista os problemas mencionados anteriormente em relação ao rastreamento dos satélites BDS. Apenas na estação VICO com intervalo de 15 minutos houve uma melhora significativa nos valores de discrepância máxima.

Tabela 6: Comparação das discrepâncias 3D, RMS e Desvio Padrão, entre IBGE-PPP (GPS/ GLONASS) e Trimble CPR (GPS/ GLONASS/ Galileo/ BDS).

Tempo (minutos)	Estação	IBGE-PPP				CPR			
		Discrepâncias 3D		RMS(m)	DESVIO(m)	Discrepâncias 3D		RMS(m)	DESVIO(m)
		Min(m)	Max(m)			Min(m)	Max(m)		
15	VICO	0,029	0,434	0,157	0,158	0,015	0,214	0,073	0,063
30		0,028	0,175	0,083	0,081	0,014	0,049	0,029	0,020
60		0,020	0,075	0,048	0,038	0,013	0,034	0,023	0,014
90		0,012	0,051	0,037	0,026	0,012	0,034	0,021	0,012
15	RJNI	0,022	0,265	0,129	0,126	0,026	0,083	0,054	0,036
30		0,014	0,124	0,068	0,056	0,025	0,087	0,052	0,019
60		0,012	0,102	0,049	0,032	0,035	0,075	0,053	0,013
90		0,020	0,112	0,056	0,033	0,040	0,075	0,054	0,011
15	SJSP	0,031	0,275	0,127	0,125	0,050	0,377	0,165	0,133
30		0,022	0,211	0,073	0,066	0,016	0,147	0,070	0,058
60		0,017	0,156	0,071	0,056	0,037	0,178	0,069	0,041
90		0,026	0,124	0,062	0,043	0,036	0,110	0,061	0,026

Fonte: Autores, (2024).

Assim, verifica-se que, diante do cenário atual, o BDS não traz praticamente nenhuma melhora nos resultados obtidos no processamento multi-constelações com o CPR. Em contrapartida, de forma geral, é evidente que o processamento multi-constelações (G+R+E ou G+R+E+C) com o CPR apresenta os melhores resultados se comparado com o IBGE-PPP.

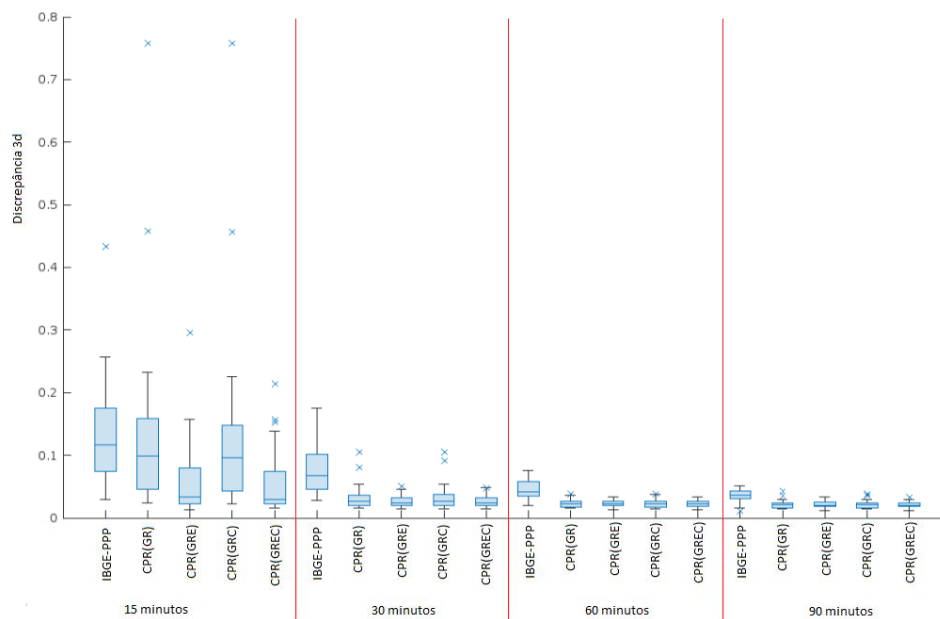
Um fator importante em termos práticos, diz respeito ao tempo de coleta dos dados. É justamente nessa questão que o CPR apresenta desempenho significativamente superior. Contudo, isso não ocorre na estação SJSP. É interessante notar que esta é a única estação em que a antena não foi fabricada pela Trimble. Conforme pode ser observado na Tabela 1, na estação SJSP está instalada um receptor e antena da empresa Septentrio. De acordo com os

apêndices 1, 2 e 3, também é possível notar que na média, o número de satélites utilizados nos processamentos com o receptor e antena da Septentrio é um pouco menor do que os receptores e antenas da Trimble. Mesmo nestas condições, o IBGE-PPP proporcionou resultados compatíveis com as outras estações. Isso mostra a importância em realizar novos experimentos com o CPR utilizando dados de receptores de outros fabricantes.

Em contrapartida, com uso de receptores e antenas da Trimble, a melhora dos resultados é significativa para intervalos de apenas 15 minutos de coleta. De acordo com a Tabela 6, para a estação VICO, o IBGE-PPP proporcionou RMS igual a 0,157 m e desvio padrão igual a 0,158 m. No caso do posicionamento multi-constelações com o CPR, o valor do RMS foi igual a 0,073 m e o desvio padrão igual a 0,063 m, o que evidencia uma melhora significativa (uma ordem de magnitude). No caso da estação RJNI, com apenas 15 minutos de dados com posicionamento multi-constelações CPR, o valor do RMS foi de apenas 0.054 m e o desvio padrão igual a 0.036 m.

Além das tabelas apresentadas, foram elaborados gráficos boxplot (diagrama de caixa). É uma ferramenta gráfica muito interessante para realizar análises comparativas. As figuras 2, 3 e 4, mostram, respectivamente, os diagramas de caixa das discrepâncias das estações VICO, RJNI e SJSP, respectivamente.

Figura 2: BoxPlot de Discrepância 3D Estação VICO.

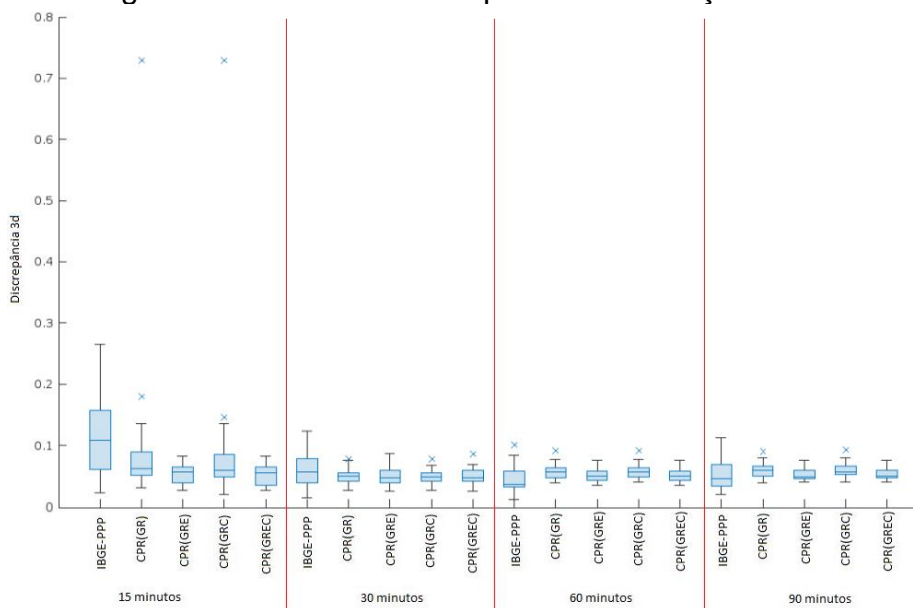


Fonte: Autores (2024).

De forma geral, os maiores valores de discrepâncias e suas variações ocorrem para intervalos de tempo de 15 minutos. Outliers de maiores magnitudes também ocorrem nesse intervalo de tempo. Porém, um resultado merece destaque. No caso do posicionamento multi-constelações (CPR(GRE) ou CPR(GREC)) com intervalo de apenas 15 minutos proporcionou melhores resultados (com exceção do valor máximo) do que o IBGE-PPP com o dobro de intervalo de coleta (30 minutos).

Com o aumento do intervalo de coleta os resultados melhoram, contudo, tendem a estabilizar a partir de 60 minutos.

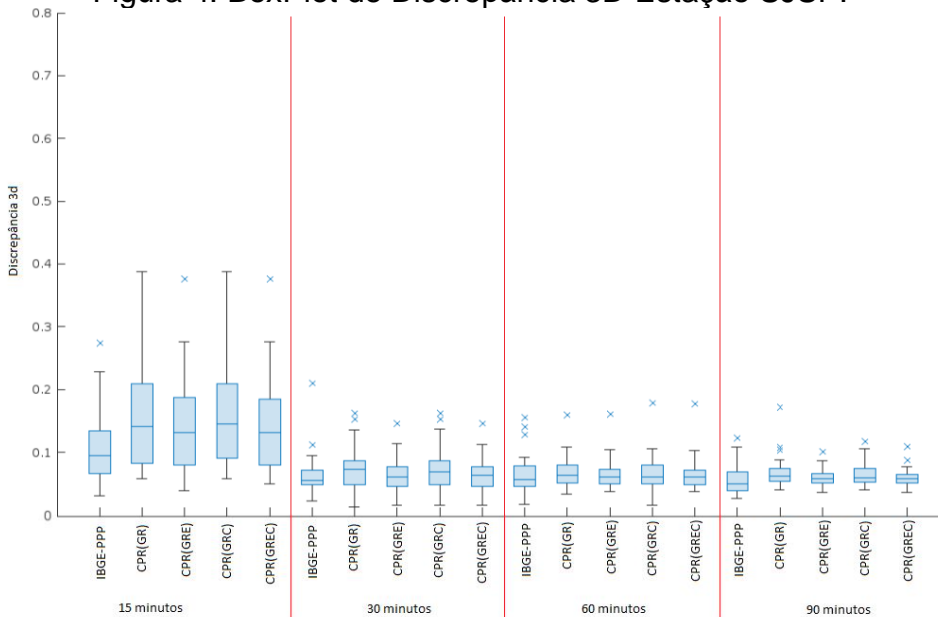
Figura 3: BoxPlot de Discrepância 3D Estação RJNI.



Fonte: Autores (2024).

Os resultados apresentados na figura 3 (RJNI) apresentam resultados similares aos apresentados na Figura 2 (VICO). Contudo, para intervalos de 15 minutos a estação RJNI apresentou melhores resultados considerando o CPR. Novamente o posicionamento multi-constelações CPR (CPR(GRE) ou CPR(GREC)) proporcionou melhores resultados com apenas 15 minutos de coleta em comparação com IBGE-PPP com 30 minutos de coleta. Os resultados foram similares até mesmo para intervalos de tempo maiores com o IBGE-PPP (60 e 90 minutos). Em contrapartida, de acordo com o diagrama de caixa apresentado na Figura 4 (SJSP), não foram obtidos resultados similares aos apresentados nas Figuras 2 e 3 (VICO e RJNI).

Figura 4: BoxPlot de Discrepância 3D Estação SJSP.



Fonte: Autores (2024).

Neste caso, o posicionamento multi-constelações não proporcionou melhora nos resultados obtidos. Conforme já mencionado, a estação SJSP utiliza receptores

e antenas de fabricantes diferentes das estações VICO e RJNI. Contudo, não se pode afirmar que isso foi responsável pela não melhoria do posicionamento multi-constelações na estação SJSP. Porém, diante dos resultados apresentados, fica evidente que novas pesquisas devem ser realizadas com uso de dados GNSS coletados por antenas e receptores de fabricantes diferentes para analisar em um aspecto mais amplo.

Algumas estações da RBMC coletam dados GNSS com modelos de receptores e antenas diferentes, como por exemplo as estações MGJF (Juiz de Fora-MG) com antenas e receptores da empresa Leica, CHPI (Cachoeira Paulista-SP) com receptor Septentrio e antena Topcon, e GVA1 (Governador Valadares-MG) com receptor Ashtech e antena NavXperience. Todas essas antenas fazem parte do banco de dados de antenas do CPR. Outra possibilidade é utilizar dados de outras redes ativas, como a rede CORS (Continuously Operating Reference Stations) do NGS (National Geodetic Survey) (https://geodesy.noaa.gov/CORS_Map/) ou da rede IGS (<https://igs.org/network/>). Por fim, destaca-se que os diagramas de caixa evidenciam a pouca contribuição dos satélites BDS devido aos problemas de rastreamento previamente mencionados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos, conclui-se que o CPR é um sistema de posicionamento multi-constelações muito atrativo, visto que com intervalo de coleta de apenas 15 minutos (GRE ou GREC) pode proporcionar resultados melhores do que o IBGE-PPP com o dobro do intervalo de coleta (30 min). No caso da estação RJNI, os resultados foram similares até mesmo para intervalos de tempo maiores com o IBGE-PPP (60 e 90 minutos).

Contudo, o uso do CPR exige um pouco mais de conhecimento por parte do usuário, visto que deve-se estar atento a transformação de referencial e época das coordenadas estimadas para o SIRGAS2000, época 2000,4. Esta tarefa pode ser realizada de forma simples com o uso do programa online gratuito ECTT. Em contrapartida, o posicionamento multi-constelações não proporcionou melhores resultados na estação SJSP, que não utiliza receptor e antena fabricado pela Trimble.

O CPR com uso de dados das constelações GPS e GLONASS não apresenta melhores resultados do que o IBGE-PPP com intervalo de 15 minutos. Em função do problema de observações da constelação BDS, resultados similares foram obtidos com o CPR com dados das constelações GPS, GLONASS e BDS. Porém, com dados das constelações GPS, GLONASS e Galileo, a melhora da qualidade posicional é significativa nas estações VICO e RJNI. Diante ao exposto, pode-se concluir que embora não esteja completa, a constelação Galileo se destaca de forma positiva em relação à BDS, devido aos problemas de rastreamento de satélites BDS-3 ainda recorrentes.

Para trabalhos futuros recomenda-se realizar novos experimentos usando dados de estações mais espalhadas pelo Brasil, variando a latitude e longitude das estações. Em função dos resultados obtidos na estação SJSP, recomenda-se processar dados de estações da RBMC com receptores e antenas de diferentes fabricantes, conforme destacado nos Resultados. Outra possibilidade é utilizar dados de outras redes ativas, como a rede CORS ou da rede IGS. Como essas redes são globais, pode-se também selecionar estações GNSS em regiões de atividade ionosféricas distintas, como nas regiões de médias latitudes (Europa -

região menos ativa da ionosfera) e nas regiões polares (regiões mais ativas da ionosfera). Com isso, também pode-se verificar o desempenho do CPR em função dos efeitos da ionosfera.

Com dados de redes ativas globais também recomenda-se processar dados GNSS localizados nos EUA (rede IGS ou CORS) e na Europa (rede IGS) para comparar com os resultados obtidos com dados de estações da RBMC, para verificar se o desempenho do CPR é melhor em regiões com maior número de estações de rastreamento da Trimble.

Referências

DOUCET, K.; HERWIG, M.; KIPKA, A.; KREIKENBOHM, P.; LANDAU, H.; LEANDRO, R.; MOESSMER, M.; PAGELS, C. **Introducing Ambiguity Resolution in Web-hosted Global Multi-GNSS Precise Positioning with Trimble RTX-PP**. Trimble TerraSat GmbH, Germany, 2012. <https://positioningservices.trimble.com/wp-content/uploads/2019/02/Trimble_WhitePaper_Trimble-CenterPoint-RTX-Post-Processed-Delivery.pdf>.

GA (Geoscience Australia). **AUSPOS – Online GPS Processing Service**. Disponível em: <<https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>>. Acesso em 20 de Novembro de 2022.

GAPS (GPS Analysis and Positioning Software). 2022. **Basic user default processing options**. Disponível em: <<http://gaps.gge.unb.ca/basicuser.html>>. Acesso em: 30 de Novembro de 2022.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Serviço online para pós-processamento de dados GNSS – IBGE-PPP**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=saiba-mais-edicao>>. Acesso em 30/11/2022.

INSIDE GNSS (2020). **Now Operational, BeiDou Could Conceal Cybersecurity Threat**. Disponível em: <<https://insidegnss.com/now-operational-beidou-could-conceal-cybersecurity-threat/>>. Acesso em: 14 de Novembro de 2022.

NARDO, A.; DRESCHER, R.; BRANDL, M.; CHEN, XIAOMING; LANDAU, H.; SOLANO, C.R.; SEEGER, S.; WEINBACH, U. **Experiences with Trimble CenterPoint RTX with Fast Convergence**. Trimble TerraSat GmbH, Haringstrasse, Hoehenkirchen, Germany, abril 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/A-Nardo/publication/289211429_Experiences_with_Trimble_CenterPoint_RTX_with_Fast_Convergence/links/56c3032d08ae602342506e2b/Experiences-with-Trimble-CenterPoint-RTX-with-Fast-Convergence.pdf>.

WESTON, N. D.; SOLER, T. **Rigorous Geodetic Positioning in the Americas**. 8th FIG Regional Conference Surveying towards Sustainable Development, Uruguay, 2012. pp.1-13.

ZADJEL, R.; STEIGENBERGER, P.; MONTENBRUCK, O. **On the potential contribution of BeiDou-3 to the realization of the terrestrial reference frame scale**. GPS SOLUTIONS, 26, n°109, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10291-022-01298-0.pdf>>.