



Qual a precisão conseguida no posicionamento GNSS com processamento online na Web?

Dora ROQUE¹ e José Nuno LIMA¹

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa

(droque@lnec.pt; jnplima@lnec.pt)

Palavras-chave: GNSS, Geodesia, Precise Point Positioning, online Web, software, monitorização, precisão

Resumo: Nos últimos anos têm aparecido na internet várias aplicações para o processamento automático das observações GNSS (*online GNSS software processing*). São serviços disponibilizados por instituições e empresas com larga experiência no desenvolvimento de *software* e *hardware* para o GNSS. Sendo, por isso, serviços de grande credibilidade e, sobretudo, de muita utilidade com precisão geodésica. Para esta apresentação, foi escolhido o serviço do *Canadian Space Reference System* (CSRS-PPP) que utiliza o processamento do tipo *Precise Point Positioning* (PPP). Os resultados obtidos através deste serviço foram analisados através da sua comparação com resultados obtidos para os mesmos dados com um *software* comercial.

No *Campus* do LNEC estiveram durante três anos duas estações GNSS, em observação contínua, distanciadas uma da outra cerca de 40 m. A estação de referência estava instalada num varão metálico localizado no topo do edifício Gulbenkian, enquanto a segunda estação estava sobre um suporte metálico cravado numa sapata de betão no relvado adjacente ao edifício. Foram utilizados dois recetores Topcon GB-1000, com antenas *choke ring*. As observações foram efetuadas em modo estático, a cada 30 segundos, tendo sido utilizados dados das constelações GPS e GLONASS.

Para a comparação entre diferentes soluções de processamento, foi considerado o intervalo de tempo entre outubro e dezembro de 2017. O processamento de referência foi efetuado com o *software* Pinnacle da Topcon. As observações foram tratadas para obter soluções diárias. Foram determinados os deslocamentos da antena no relvado em relação à antena no edifício, através do método de posicionamento relativo.

No caso do CSRS-PPP, este serviço aceita observações GNSS em formato RINEX (*Receiver INdependent Exchange*). Os ficheiros foram submetidos numa plataforma *online* para processamento através deste método. Os resultados foram disponibilizados por e-mail, poucos minutos após a sua submissão, e contêm diversos ficheiros de texto com informação sobre a posição, correção troposférica e relógio, para cada estação. Este método foi utilizado para obter as coordenadas tridimensionais de cada uma das estações GNSS através de posicionamento absoluto. Os deslocamentos da estação no relvado em relação à estação no edifício foram determinados posteriormente, a partir das coordenadas, para serem comparados com os deslocamentos obtidos com o Pinnacle.

Comparando os resultados obtidos pelos dois métodos, verificou-se que a incerteza associada aos resultados do CSRS-PPP foi uma ordem de grandeza superior à do Pinnacle. No Pinnacle, a incerteza média em M e P foi de 0,4 mm, enquanto no CSRS-PPP foi de 4,8 mm em M e 2,7 mm em P. Na componente vertical, no Pinnacle foi obtido o valor 1,0 mm, enquanto no CSRS-PPP atingiu-se o valor 10,9 mm.

PPP é um processamento muito rápido e eficiente para se obter coordenadas com precisão centimétrica. No entanto, com este tipo de processamento não é possível obter a qualidade do posicionamento relativo em pós-processamento. Isto deve-se, essencialmente, a duas razões: a impossibilidade de se resolver as ambiguidades da fase portadora e desprezar a correlação entre as estações e as correções dos relógios dos recetores.

Dado que os dados analisados são anteriores a 2018, o estudo não beneficiou das melhorias introduzidas no serviço CSRS-PPP a partir de janeiro desse ano.



1. Introdução

Em dezembro de 2023 foi quinquagésimo aniversário do *Global Positioning System*, mais conhecido pela sua sigla GPS. O GPS apesar de ser inicialmente um sistema exclusivamente militar revolucionou por completo a nossa vida na Terra. Mas os desenvolvimentos feitos pelos civis no GPS é uma história que merece ser contada. Como disse Steve DeLoach, antigo Vice-Chefe da *Engineering and Construction* do *U.S. Army Corps of Engineering*, “é uma grande história de um sistema geodésico feito por geodetas para geodetas” (Hartmann, 2021).

Assim que foi lançado, em 1978, o primeiro satélite do então novo sistema de posicionamento militar o *Global Positioning System* (GPS), a comunidade civil viu um enorme potencial na utilização deste para o posicionamento e navegação marítima e terrestre. O GPS tinha sido projetado para utilizar sinais baseados em códigos especificamente desenvolvidos para este sistema, com precisões esperadas de 3 a 5 metros em planimetria e 10 a 15 metros em altimetria. Mas porque não utilizar os sinais das ondas portadoras desses códigos, de modo a atingir precisões milimétricas, ou seja, precisões mil vezes superiores às precisões então previstas pelos inventores do GPS? Os sonhos começaram a tomar forma com o desenvolvimento do primeiro recetor GPS por Charles Counselman III, o *Macrometer V-1000*, que se baseava na técnica interferométrica aplicada no VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), mas aplicada aos sinais emitidos pelos satélites do GPS. E, embora não tendo acesso aos códigos do GPS, conseguia reconstruir as fases das ondas portadoras e posicionar, mas, contudo, necessitava do conhecimento prévio das órbitas dos satélites e do estado dos relógios dos satélites. Esta informação, como se sabe, só é acedida pelos recetores com acesso aos códigos do GPS. Desde então, novos desenvolvimentos foram disponibilizados, como, por exemplo, o posicionamento cinemático, o RTK (*Real Time Kinematic*), o *Precise Point Positioning* (PPP), etc.

Hoje em dia existem na internet várias aplicações para o processamento automático das observações GNSS (*online GNSS software processing*). São serviços que instituições e empresas com anos de experiência no desenvolvimento de *software* e *hardware* para o GNSS disponibilizam gratuitamente. Sendo, por isso, serviços de grande credibilidade e, sobretudo, de muita utilidade com precisão geodésica. Para esta apresentação, foi escolhido o serviço do *Canadian Space Reference System* (CSRS-PPP) que utiliza o processamento do tipo *Precise Point Positioning* (PPP). Os resultados obtidos através deste serviço foram analisados através da sua comparação com resultados obtidos para os mesmos dados com um *software* comercial. Esta análise foi desenvolvida no âmbito de um estudo realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para validação e avaliação da incerteza de deslocamentos observados com interferometria radar de abertura sintética (*interferometric synthetic aperture radar – InSAR*).

2. A técnica PPP (Precise Point Positioning)

2.1 O início da técnica PPP (Precise Point Positioning)

Em 1997 Zumberge et al. (1997) apresenta uma técnica para processar e analisar as observações GNSS, a que designou por PPP (*Precise Point Positioning*), que se baseia em estimativas precisas de parâmetros GNSS – posições dos satélites e correções dos relógios – que são calculadas diariamente pelo *International GNSS Service* (IGS). Desta forma, tornou-se possível posicionar com precisão um recetor GNSS geodésico numa localização arbitrária recorrendo aos parâmetros difundidos diariamente pelo IGS e utilizando o *software* Gipsy desenvolvido no JPL (*Jet Propulsion Laboratory*, NASA, Califórnia, EUA).

Na prática, o PPP acaba por ser similar ao modo de posicionamento relativo (i.e., à utilização de um recetor de referência), mas recorre ao uso das estimativas dos estados dos relógios dos satélites em vez de recorrer às diferenças entre estações para eliminar os erros dos relógios dos satélites. Assim, é possível posicionar um local em relação ao ITRF utilizando órbitas IGS fixas, parâmetros de orientação da Terra e estimativas do relógio do satélite. A posição da estação, os atrasos troposféricos na direção zenital (*zenital delays*), o relógio da estação e os parâmetros de ambiguidade de fase são estimados utilizando a combinação linear que elimina os atrasos de primeira ordem provocados pela ionosfera.

As vantagens desta abordagem são

- 1- Não requer dados duma estação fixa (estação de referência) para o cálculo da posição;
- 2 - Em princípio, proporciona uma precisão consistente em qualquer parte do mundo. Em particular, nos casos onde a rede de estações do IGS se encontra distribuída de forma mais uniforme; e
- 3- É um procedimento muito eficiente e requer um tempo mínimo de processamento computacional. No entanto, não é significativamente mais eficiente do que o processamento em modo relativo, e é essencialmente equivalente ao modo relativo com uma estação de referência fixa (sem resolução de ambiguidade).

Algumas das limitações são



1 - Não permitia diretamente, até há alguns anos, a resolução de ambiguidades, limitando assim a precisão horizontal em cerca de 1 cm, em comparação com o modo de processamento relativo com resolução de ambiguidades, que é 2 a 3 vezes mais preciso, principalmente na componente este. Este é certamente um fator limitativo para as medições de distância-média em que a resolução da ambiguidade é crítica;

2 - É mais difícil editar os dados de fase em medições de fase não diferenciadas, especialmente com o AS (*anti-spoofing*) ativado; e

3- A análise deve ser efetuada com o mesmo *software* de processamento (i.e., os mesmos modelos) que foi utilizado para calcular as órbitas fixas, os parâmetros de orientação da Terra e os relógios dos satélites.

2.2 Serviços de processamento de observações GNSS disponibilizados na internet

Atualmente existem na internet várias aplicações para o processamento automático das observações GNSS (*online GNSS software processing*). São serviços desenvolvidos por instituições e empresas com muita experiência no desenvolvimento de *software e hardware* para o GNSS. Sendo, por isso, serviços de grande credibilidade e, sobretudo, de muita utilidade com precisão geodésica. Para esta apresentação, foi escolhido o serviço do *Canadian Space Reference System (CSRS-PPP)* que utiliza o processamento do tipo *Precise Point Positioning (PPP)*. Os resultados obtidos através deste serviço foram analisados através da sua comparação com resultados obtidos para os mesmos dados com um *software* comercial, o Pinnacle da Topcon. Atualmente existem na internet vários serviços que permitem posicionar qualquer estação, conforme se mostra no Quadro 1.

Quadro 1 – Serviços de processamento de observações GNSS disponibilizados na internet segundo Albayrak et al. (2020)

Serviço	Técnica	Organização	Software	Website
AUSPOS	Processam. relativo / PPP	Geoscience Australia	Bernese	http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl
OPUS	Processam. relativo	National Geodetic Survey (NGS)	PAGES	https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/
SCOUT	?	SOPAC	GAMIT	http://sopac-old.ucsd.edu/scout.shtml
CRCS-PPP	PPP	National Resources Canada (NRCan)	NRCanPPP	http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php
GAPS-PPP	PPP	University of New Brunswick	GAPS	http://gaps.gge.unb.ca/
APPS	PPP	Jet Propulsion Laboratory (JPL)	Gipsy	http://apps.gdgps.net/
TRIMBLE-RTX	?	Trimble Navigation	Trimble-RTX	https://www.trimblertx.com/

3. As observações GNSS utilizadas no estudo

No Campus do LNEC estiveram durante três anos duas estações GNSS, em observação contínua, distanciadas uma da outra cerca de 40 m. A estação de referência esteve instalada num varão metálico localizado no topo do edifício Gulbenkian, enquanto a segunda estação esteve sobre um suporte metálico cravado numa sapata de betão no relvado adjacente ao edifício. Foram utilizados dois recetores Topcon GB-1000, com antenas *choke ring* (Figura 1). As observações foram efetuadas em modo estático, a cada 30 segundos, tendo sido utilizados dados das constelações GPS e GLONASS.

Para a comparação entre diferentes soluções de processamento, foi considerado o intervalo de tempo entre outubro e dezembro de 2017. O processamento de referência foi efetuado com o *software* Pinnacle da Topcon. As observações foram tratadas para obter soluções diárias. Foram determinados os deslocamentos da antena no relvado em relação à antena no edifício, através do método de posicionamento relativo.

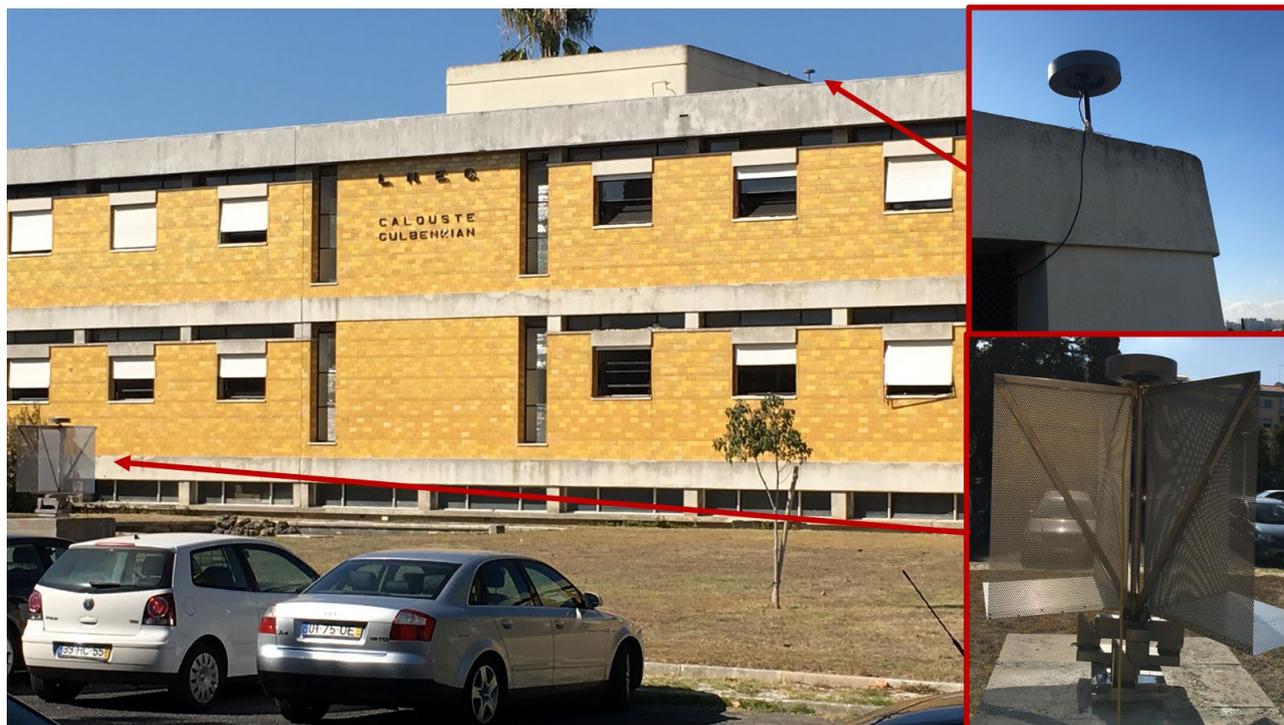


Figura 1 – As duas estações GNSS instaladas no Campus do LNEC, dois recetores Topcon GB-1000 com antenas do tipo *choke-ring* da Topcon

4. Processamento das observações GNSS

4.1 Pré-processamento das observações

As observações dos Topcon GB-1000 são por norma registadas num formato específico da Topcon, designado por TPS. Foram, por isso, convertidas para o formato RINEX com o *software* JPS2RIN, tendo-se tido o cuidado de identificar a antena utilizada, o modelo TPSCR3_GGD.

Com a função TBIN do *software* TEQC dividiram-se os ficheiros em formato RINEX em ficheiros diários (24 horas).

4.2 Processamento dos dados

A determinação das coordenadas tridimensionais foi efetuada para cada dia com o *software web-based* disponibilizado pelo *Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning (CSRS-PPP)* (<https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/geodetic-reference-systems/data/10923>). Os ficheiros RINEX foram compactados num único ficheiro com menos de 300 MB e submetido para ser processado no *link* indicado. As soluções diárias foram enviadas alguns minutos depois, um ficheiro por cada dia/solução (coordenadas e respetivos sigmas 95%), conforme se pode ver na Figura 2.

Foi desenvolvido um pequeno programa em Python para extrair as coordenadas, sigmas associados e matriz de correlação.

No Excel foram criadas séries temporais com as diferenças entre as duas estações (vetor) e com as variações dessas diferenças (deslocamentos entre a estação de referência e o refletor), com os respetivos sigmas.

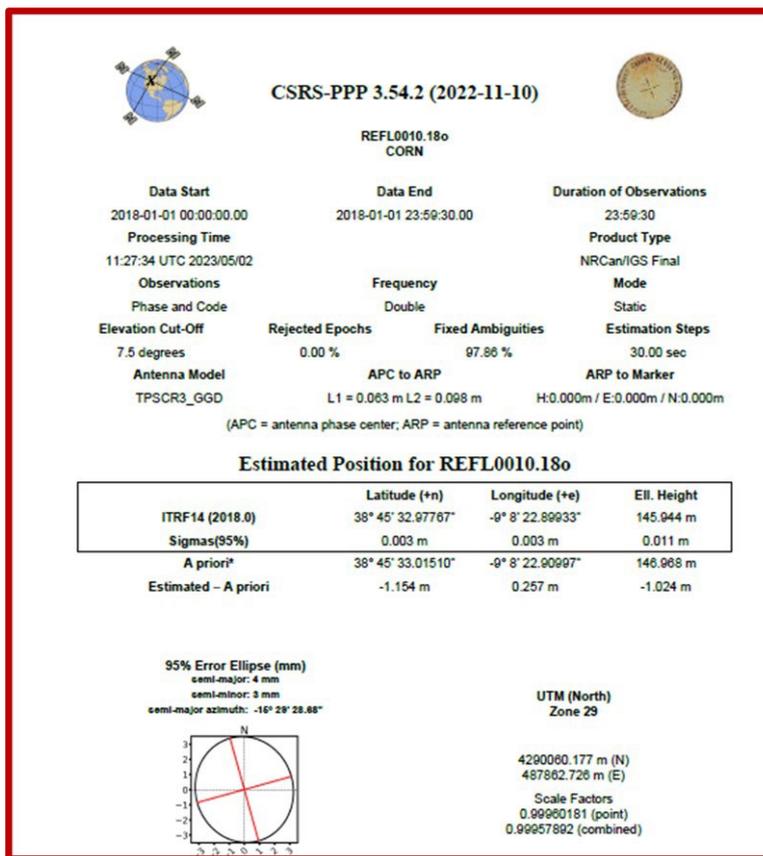


Figura 2 – Exemplo do ficheiro de saída para uma solução diária utilizando o software CSRS-PPP

5. Análise das séries temporais

No âmbito de um estudo para validação e avaliação da incerteza de deslocamentos InSAR, foi projetado e construído no LNEC um refletor artificial (*corner reflector*) passivo bidirecional para os satélites Sentinel-1A/B (Roque, 2020). A estrutura do refletor é composta por dois triedros, cada um deles formado por duas chapas retangulares verticais e uma chapa quadrada horizontal. Os ângulos entre as três chapas são ângulos retos. Um dos triedros está orientado para a linha de vista da passagem ascendente da órbita relativa 45 e o outro para a linha de vista da passagem descendente da órbita relativa 125. As arestas verticais dos dois triedros interseitam-se num varão, cujo topo tem uma rosca para encaixe de uma antena GNSS. O refletor tem um mecanismo que permite deslocá-lo ao longo de direções pré-definidas (Figura 3).

O refletor está instalado no *campus* do LNEC, no relvado adjacente ao edifício Gulbenkian, desde outubro de 2017. Entre a data da sua instalação e outubro de 2020, o refletor esteve equipado com uma antena GNSS em permanência, com uma observação a cada 30 segundos. A antena de referência foi colocada no telhado do edifício Gulbenkian do LNEC, a cerca de 40 m da antena do refletor.

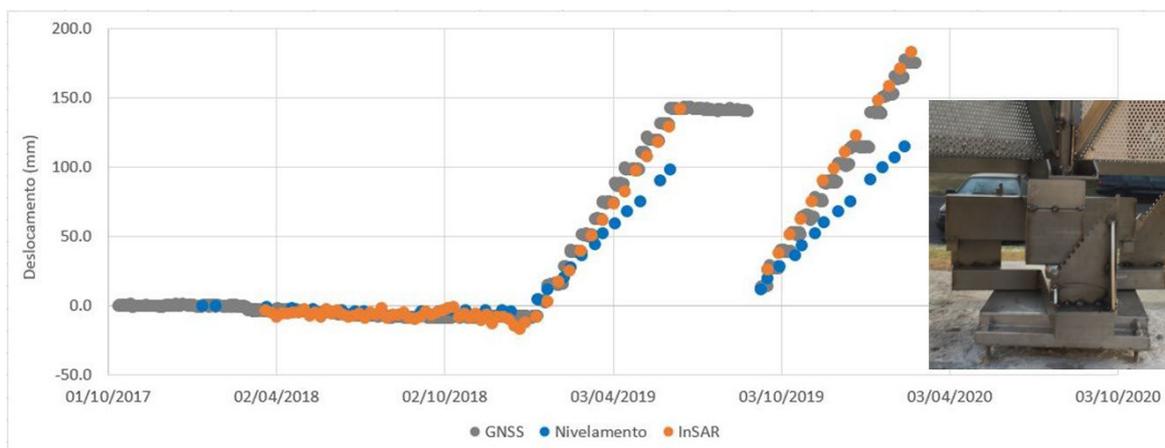


Figura 3 – Comparação das soluções do InSAR (bolas laranjas), com as soluções GNSS (Pinnacle, bolas cinzentas) e com o nivelamento geométrico (bolas azuis). Na direita da figura, vê-se o mecanismo na base do refletor que permite a deslocação, em degraus, na direção da passagem descendente do satélite

Na Figura 3 mostra-se a comparação das séries temporais das soluções GNSS, das soluções do InSAR e do nivelamento geométrico na direção refletor – passagem ascendente do satélite. Note-se que as divergências com as soluções do nivelamento geométrico resultam do facto de não haver deslocamentos na componente Este-Oeste observadas por esta técnica. Caso contrário, as três soluções convergiriam na ordem dos milímetros.

Na Figura 4 compara-se as soluções GNSS obtidas dos diferentes processamentos com o Pinnacle e com o CSRS-PPP, na componente este-oeste e respetivos desvios padrão, referente aos três últimos meses de 2017. Note-se que neste período não foi introduzido qualquer deslocamento no refletor (*corner-reflector*).

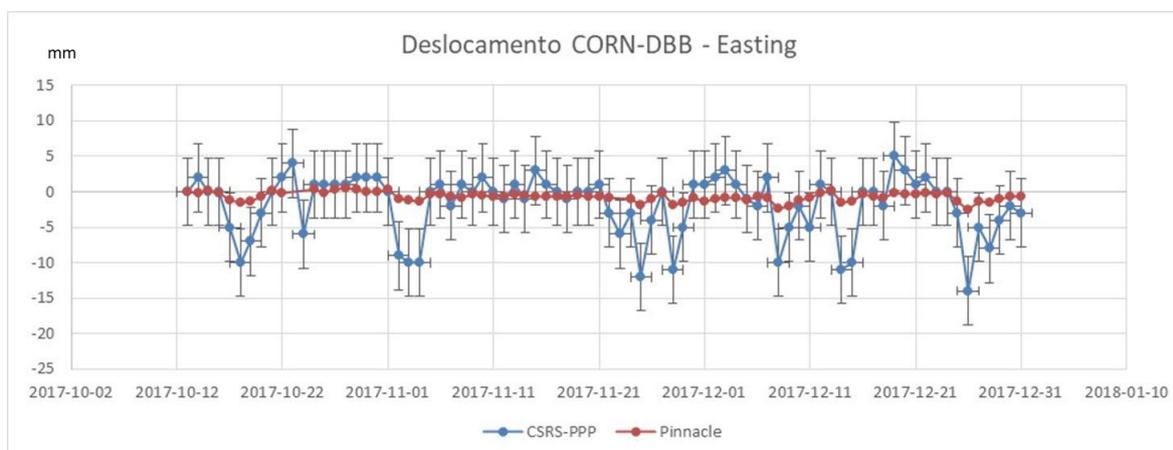


Figura 4 – Comparação das soluções GNSS obtidas com o Pinnacle (bolas vermelhas) e com CSRS-PPP (bolas azuis), na componente este-oeste

Na Figuras 5 e 6 mostram-se as comparações das soluções GNSS obtidas dos diferentes processamentos com o Pinnacle e com o CSRS-PPP, nas componentes norte-sul e altimétrica, respetivamente, bem como os respetivos desvios padrão, referente aos três últimos meses de 2017.

Comparando os resultados obtidos pelos dois métodos, verificou-se que a incerteza associada aos resultados do CSRS-PPP foi uma ordem de grandeza superior à do Pinnacle. No Pinnacle, a incerteza média em M e P foi de 0,4 mm, enquanto no CSRS-PPP foi de 4,8 mm em M e 2,7 mm em P. Na componente vertical, no Pinnacle foi obtido o valor 1,0 mm, enquanto no CSRS-PPP atingiu-se o valor 10,9 mm.

O PPP é um processamento muito rápido e eficiente para se obter coordenadas com precisão centimétrica. No entanto, com este tipo de processamento não é possível obter a qualidade do posicionamento relativo em pós-processamento. Isto deve-se, essencialmente, a duas razões: a impossibilidade de se resolver as ambiguidades da fase portadora e desprezar a correlação entre as estações e as correções dos relógios dos recetores (Dach *et al*, 2007).



Foi realizado para cada componente o teste T-Welch, para um nível de confiança de 95%, para comparar os valores médios que resultam de cada processamento (CSRS-PPP e Pinnacle), tendo em conta os sigmas associados. O teste falhou em cada uma das componentes. O Quadro 2 mostra a análise estatística das duas soluções (nas três componentes) e respetivos testes T-Welch.

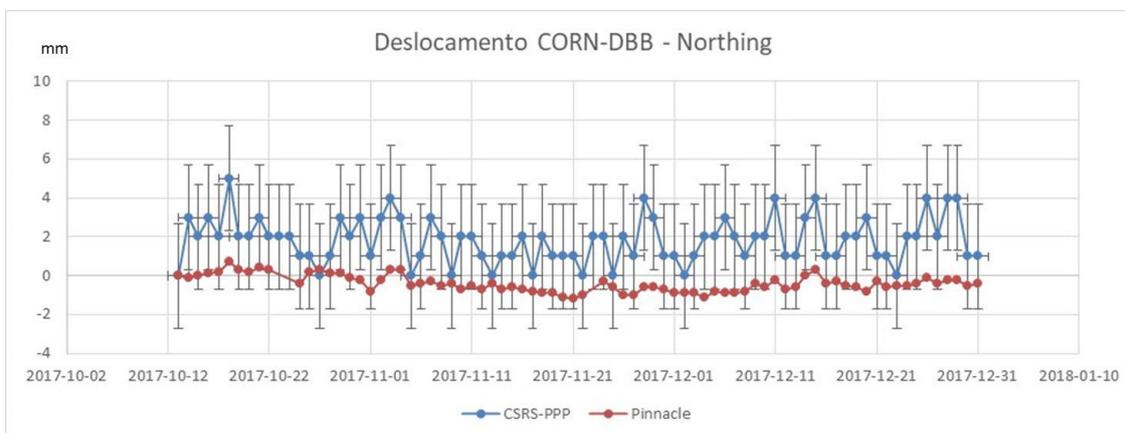


Figura 5 – Comparação das soluções GNSS obtidas com o Pinnacle (bolas vermelhas) e com CSRS-PPP (bolas azuis), na componente norte-sul

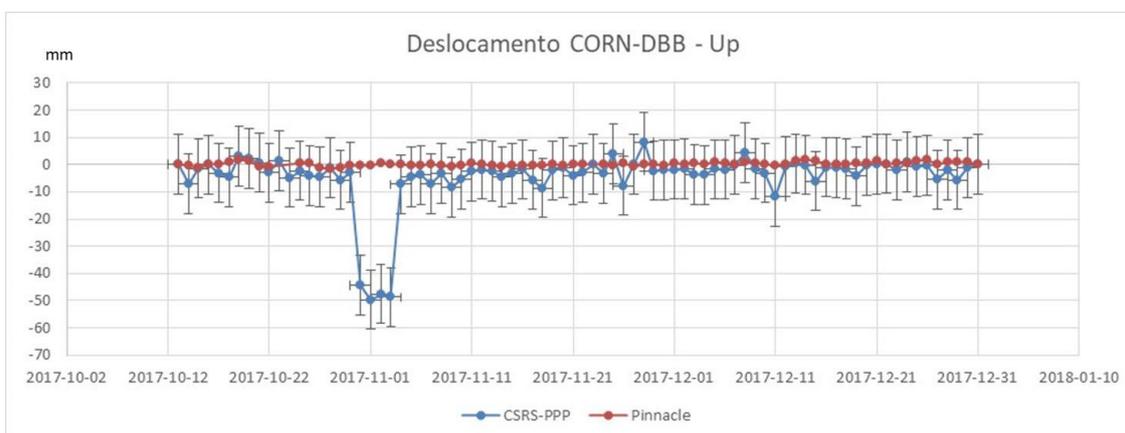


Figura 6 – Comparação das soluções GNSS obtidas com o Pinnacle (bolas vermelhas) e com CSRS-PPP (bolas azuis), na componente altimétrica

Quadro 2 – Análise estatística das duas soluções nas três componentes e respetivos Testes T-Welch

Parâmetro	Pinnacle E	CSRS-PPP E	Pinnacle N	CSRS-PPP N	Pinnacle H	CSRS-PPP H
Média	-0,70	-1,83	-0,41	1,81	0,16	-4,63
Variância	0,40	18,04	0,18	1,39	0,47	107,92
# Observ.	77	80	77	80	77	80
Hipótese diferença média	0		0		0	
Graus liberdade	83		100		80	
T-Welch	2,34		-15,79		4,11	
P(T<= t) Unicaudal	0,01		0,00		0,00	
T crítico unicaudal	1,66		1,66		1,66	
P(T<= t) bicaudal	0,02		0,00		0,00	
T crítico bicaudal	1,99		1,98		1,99	



6. Conclusões

A comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos, CSRS-PPP e Pinnacle, dá uma vantagem clara ao processamento relativo feito com o Pinnacle. No Pinnacle, a incerteza média em M e P foi de 0,4 mm, enquanto no CSRS-PPP foi de 4,8 mm em M e 2,7 mm em P. Na componente vertical, no Pinnacle foi obtido o valor 1,0 mm, enquanto no CSRS-PPP atingiu-se o valor 10,9 mm.

Embora o PPP seja um processamento muito rápido e eficiente para se obter coordenadas com precisão centimétrica. No entanto, com este tipo de processamento não é possível obter a qualidade milimétrica do posicionamento relativo em pós-processamento. Isto deve-se, essencialmente, a duas razões: a impossibilidade de se resolver as ambiguidades da fase portadora e desprezar a correlação entre as estações e as correções dos relógios dos recetores (Dach *et al*, 2007).

Apesar de tudo, os *web-based softwares* para processarem as observações GNSS são fiáveis e têm precisão centimétrica. São sempre uma boa alternativa para quem não tem experiência em processamento de observações GNSS e não quer investir em licenças para a compra do *software* comercial ou científico.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao *National Resources Canada* (NRCan) o acesso ao serviço CRCS-PPP.

Referências Bibliográficas

- Albayrak, M, Erdogan, B. & Erkaya, H., 2020 - Performance Analysis of Web-based Relative and Precise Point Positioning Techniques with Different Satellite Visibility Conditions. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 26, no. 1, e2020003, 2020, Universidade Federal do Paraná.
- Alkan, R., Erol, S., Ozulu, I. & Ilci, V., 2020 - Accuracy comparison of post-processed PPP and real-time absolute positioning techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 11, Nº 1, 178-190. Taylor and Francis, UK.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. & Meindl, M., 2007 – BERNESE GPS SOFTWARE, Version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern.
- Hartmann, Stacey, 2021 – History of RTK – Part1: A Really Tough Problem to Solve (<https://amerisurv.com/2021/04/18/history-of-rtk-part-1-a-really-tough-problem-to-solve/>), acedido em Janeiro de 2024.
- Roque, D., 2020 – Displacement Measurement Through InSAR Geodesy for Structural Health Monitoring. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Zumberge, J.F., M. B. Heflin, D.C. Jefferson, M. M. Watkins e F.H. Webb (1997). Precise Point Positioning for Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks, *Journal of Geophysical Research*, 102 (B3): 5005-5017.