

Análise do Desempenho da Técnica de Posicionamento GNSS PPP-RTK em Tempos de Convergência Distintos

Performance Analysis of the GNSS PPP-RTK Positioning Technique at Different Convergence Times

Análisis de rendimiento de la técnica de posicionamiento GNSS PPP-RTK en diferentes tiempos de convergencia

Recebido: 28/11/2022 | Revisado: 07/12/2022 | Aceitado: 08/12/2022 | Publicado: 16/12/2022

Niel Nascimento Teixeira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3047-8932>
Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil
E-mail: nnteixeira@uesc.br

Dionísio Costa Cruz Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7148-9710>
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil
E-mail: dionisio.junior@ibge.gov.br

Wesley Sato Rodrigues

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1818-9708>
Santiago & Cintra Importação e Exportação LTDA, Brasil
E-mail: wesley_sato@santiagoecintra.com.br

Resumo

O posicionamento GNSS preciso em tempo real, realizado em âmbito global, diferentemente do RTK e do DGPS, requer o uso de somente um receptor por parte do usuário. Contudo, necessita de uma rede geodésica em nível global para a geração de produtos, tais como órbitas precisas e relógios dos satélites. Este tipo de posicionamento quando envolve ainda o emprego da solução das ambigüidades da fase como valores inteiros, é denominado de Técnica de Posicionamento PPP-RTK. Em de 2011 a Trimble introduziu o serviço de posicionamento em tempo real denominado de Centerpoint RTX, que utiliza dados de uma rede global GNSS ativa composta por 107 estações de referência, juntamente com inovadores algoritmos de modelagem e compressão para calcular e retransmitir órbitas precisas dos satélites, além de informações e correções a respeito do relógio do sistema e ambigüidades da fase da onda portadora. Deste modo, o principal objetivo deste trabalho é o de avaliar a acurácia da Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com o uso de correções provenientes do Serviço Trimble Centerpoint RTX no Brasil em três tempos de convergência distintos. Para isto foram realizados levantamentos GNSS em todos os estados da Federação em Estações do SGB, cujas coordenadas foram consideradas como de referência. Aplicou-se os testes estatísticos *t* de Student – para detectar possíveis erros sistemáticos nos dados e, o Qui-Quadrado para avaliar a precisão das coordenadas. Finalmente, os resultados apontam que a acurácia horizontal melhora gradativamente com o aumento do tempo de convergência, alcançando $0,031 \pm 0,007$ (Tendência e Precisão) para 30 minutos de convergência.

Palavras-chave: Posicionamento GNSS; PPP-RTK; Acurácia; SGB.

Abstract

Precise real-time GNSS positioning, performed globally, unlike RTK and DGPS, requires the user to use only one receiver. However, it needs a global geodetic network to generate products such as precise orbits and satellite clocks. This type of positioning, when it also involves the use of the solution of phase ambiguities as integer values, is called PPP-RTK Positioning Technique. In 2011, Trimble introduced a real-time positioning service called Centerpoint RTX, which uses data from an active global GNSS network of 107 reference stations, along with innovative modeling and compression algorithms to calculate and relay precise satellite orbits. , as well as information and corrections regarding system clock and carrier wave phase ambiguities. Thus, the main objective of this work is to evaluate the accuracy of the PPP-RTK Positioning Technique, using corrections from the Trimble Centerpoint RTX Service in Brazil at three different convergence times. For this, GNSS surveys were carried out in all states of the Federation in SGB Stations, whose coordinates were considered as reference. Student's *t* statistical tests were applied - to detect possible systematic errors in the data, and the Chi-Square test to assess the accuracy of the coordinates. Finally, the results indicate that the horizontal accuracy gradually improves with the increase in the convergence time, reaching 0.031 ± 0.007 (Trend and Accuracy) for 30 minutes of convergence.

Keywords: GNSS Positioning; PPP-RTK; Accuracy; SGB.

Resumen

El posicionamiento GNSS preciso en tiempo real, realizado globalmente, a diferencia de RTK y DGPS, requiere que el usuario use solo un receptor. Sin embargo, necesita una red geodésica global para generar productos como órbitas precisas y relojes satelitales. Este tipo de posicionamiento, cuando implica además el uso de la solución de ambigüedades de fase como valores enteros, se denomina Técnica de Posicionamiento PPP-RTK. En 2011, Trimble presentó un servicio de posicionamiento en tiempo real llamado Centerpoint RTX, que utiliza datos de una red GNSS global activa de 107 estaciones de referencia, junto con algoritmos innovadores de modelado y compresión para calcular y transmitir órbitas satelitales precisas, así como información y correcciones relacionadas con el reloj del sistema y las ambigüedades de la fase de la onda portadora. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es evaluar la precisión de la Técnica de Posicionamiento PPP-RTK, utilizando correcciones del Servicio Trimble Centerpoint RTX en Brasil en tres tiempos de convergencia diferentes. Para ello se realizaron levantamientos GNSS en todos los estados de la Federación en Estaciones SGB, cuyas coordenadas se consideraron como referencia. Se aplicaron las pruebas estadísticas t de Student - para detectar posibles errores sistemáticos en los datos, y la prueba Chi-Cuadrado para evaluar la precisión de las coordenadas. Finalmente, los resultados indican que la precisión horizontal mejora gradualmente con el aumento del tiempo de convergencia, alcanzando $0,031 \pm 0,007$ (Tendencia y Precisión) para 30 minutos de convergencia.

Palabras clave: Posicionamiento; GNSS; PPP-RTK; Precisión; SGB.

1. Introdução

Os sistemas de navegação e posicionamento global, por meio de satélites artificiais, estão classificados entre as mais modernas e precisas técnicas de posicionamento, que nas últimas décadas registraram um desenvolvimento extraordinariamente rápido e dinâmico, contribuindo assim para o desenvolvimento técnico, científico e econômico de vários setores do mundo. A elevada precisão do GNSS (Global Navigation Satellite System) na determinação de coordenadas de pontos e objetos, de forma estática ou cinemática, utilizando métodos absolutos e/ou relativos pós-processados à nível global, é fato totalmente consagrado, não só na literatura, como também em todas as áreas do mundo que lida com posicionamento.

Até mesmo, o Posicionamento GNSS preciso em tempo real que até há pouco tempo, só poderia ser realizado à nível local e regional, por meio das técnicas RTK (Real Time Kinematic), RTK em rede e, DGPS/GNSS (Differential GPS/GNSS), tornou-se, recentemente, possível de realização em escala global. Isto se tornou possível a partir de 2008, quando o Serviço Internacional de GNSS (IGS), anunciou acesso aberto ao serviço PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) em tempo real (Teunissen & Khodabandeh, 2014).

Esta técnica de posicionamento, diferentemente do RTK e do DGPS, requer o uso de somente um receptor ao nível do usuário GNSS. Contudo, necessita de uma Rede Geodésica à nível global para a geração de produtos, tais como órbitas precisas, relógios dos satélites e outros. Além disso, para a estimativa de coordenadas geodésicas com precisão, todos os erros envolvidos com a propagação dos sinais GNSS e com as estações terrestres devem ser adequadamente modelados e tratados, dentre os quais se destacam os efeitos da ionosfera, troposfera, carga de marés oceânicas (Ocean Tide Loading), marés de corpos terrestres (Earth Body Tide) ou simplesmente marés terrestres, efeitos de relatividade, variação do centro de fase das antenas dos satélites e receptor, fase wind-up, entre outros (Wübbena et al. 2005; Mervart et al. 2008).

Nesse sentido, Marques (2012) apresenta uma metodologia – pioneira no Brasil – para estimar as correções dos relógios dos satélites GNSS em tempo real no contexto de uma rede GNSS, bem como a aplicação dessas correções no PPP em tempo real (RTPPP). Porém, a solução de ambigüidades da fase foi do tipo float e recomendou para trabalhos futuros, implementações relacionadas com a solução das ambigüidades como valores inteiros no RTPPP, o que sem dúvida nenhuma aumentaria a acurácia do posicionamento, com uma significativa redução do tempo de convergência.

O Posicionamento Por Ponto Preciso em Tempo Real, quando envolve o emprego da solução das ambigüidades da fase como valores inteiros (solução fixa), foi denominado por Wübbena et al. (2005) de PPP-RTK. Desde então, vários pesquisadores, como por exemplo Geng et al. (2011), Teunissen e Khodabandeh (2014) confirmam que a solução das ambigüidades da fase como valores inteiros é um dos princípios fundamentais do PPP-RTK.

Deste modo, tem sido realizados ao redor do mundo, várias pesquisas relacionadas à solução de ambiguidades no PPP-RTK. Ge et al. (2008), Geng et al. (2009) e, Geng et al. (2011) apresentaram uma metodologia baseada na estimativa com antecedência, dentro de uma rede GNSS, dos atrasos de fase não calibrados - UPD (*uncalibrated phase delays*), com a utilização das combinações lineares da SD (Simple Diferença) entre satélites da WL (*wide-lane*) e NL (*narrow-lane*). Outra proposta foi apresentada por Blewitt (2006), que é fundamentada na formação de DD (Dupla Diferença) das ambigüidades de uma estação de interesse com estações de uma rede GNSS e satélites em comum visualização (Blewitt, 2006). Laurichesse et al. (2008) desenvolveu um método onde, dentro de uma rede GNSS, as ambigüidades NL são absorvidas pelos relógios dos satélites na fase da onda portadora e então produzida uma solução de relógios para solucionar as ambigüidades de um receptor usuário. Outras metodologias para solução de ambigüidades no PPP-RTK foram propostas por Bertiger et al (2010); Teunissen et al (2010), Geng et al (2012) e, Lannes e Prieur (2014). Mas detalhes podem ser vistos em Teunissen e Khodabandeh (2015). Em todos estes métodos de solução de ambigüidades no PPP-RTK citados, é necessária a utilização de uma rede GNSS como suporte.

No ano de 2011 a Trimble introduziu o serviço de posicionamento em tempo real denominado de Centerpoint RTX™, que utiliza dados de uma Rede Geodésica (ativa) global GNSS composta por 107 estações de referência – de monitoramento contínuo, juntamente com inovadores algoritmos de modelagem e compressão para calcular e retransmitir órbitas precisas dos satélites, além de informações sobre o relógio do sistema e outras correções, como por exemplo, as ambigüidades da fase da onda portadora, proporcionando um posicionamento de alta acurácia em tempo real (Leandro et al., 2011; Landau et al., 2012). As correções e os parâmetros calculados são transmitidos para os usuários, em qualquer lugar do planeta, através de seis satélites geostacionários que utilizam a Banda L. O acesso à estas correções também pode ser realizado via internet usando o protocolo NTRIP (Zhang, et al., 2013).

Com isto, pretende-se com esta pesquisa avaliar a acurácia da Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com o uso de correções provenientes do Serviço Trimble Centerpoint RTX dentro do território nacional. Para atingir este objetivo realizou-se levantamentos GNSS em todos os estados da Federação em Estações Geodésicas pertencentes ao SGB, cujas coordenadas foram consideradas como de referência no processo de avaliação. Aplicou-se os testes estatísticos *t* de Student – para detectar possíveis tendências (erros sistemáticos) nos dados, e Qui-Quadrado para avaliar a precisão das coordenadas. Finalmente, a acurácia desta Técnica de Posicionamento GNSS foi analisada, tanto em função destas medidas estimadas, tendência e precisão, como também, por meio do Erro Quadrático Médio (EQM).

2. Revisão Teórica

2.1 Técnica de Posicionamento GNSS PPP-RTK com o uso de Correções TRIMBLE CENTER POINT RTX

O Serviço de correção CenterPoint RTX foi introduzido pela Trimble no ano de 2011, proporcionando posicionamento com acurácia centimétrica para aplicações em tempo real, nos modos estático ou cinemático. Leandro et al. (2011) denomina o Posicionamento GNSS Absoluto de alta precisão, em tempo real à nível global, com correções advindas do Serviço Trimble Centerpoint RTX de “*RTX global RTK system*”. Porém, os fundamentos do princípio de posicionamento por meio da utilização deste Serviço, estão adequadamente contemplados dentro da técnica de posicionamento denominada PPP-RTK, que foi originalmente introduzida por Wübbena et al. (2005), a qual integra as vantagens do PPP e RTK e permite a resolução de ambigüidades inteiras do PPP, o que é plenamente corroborado por Teunissen e Khodabandeh (2014).

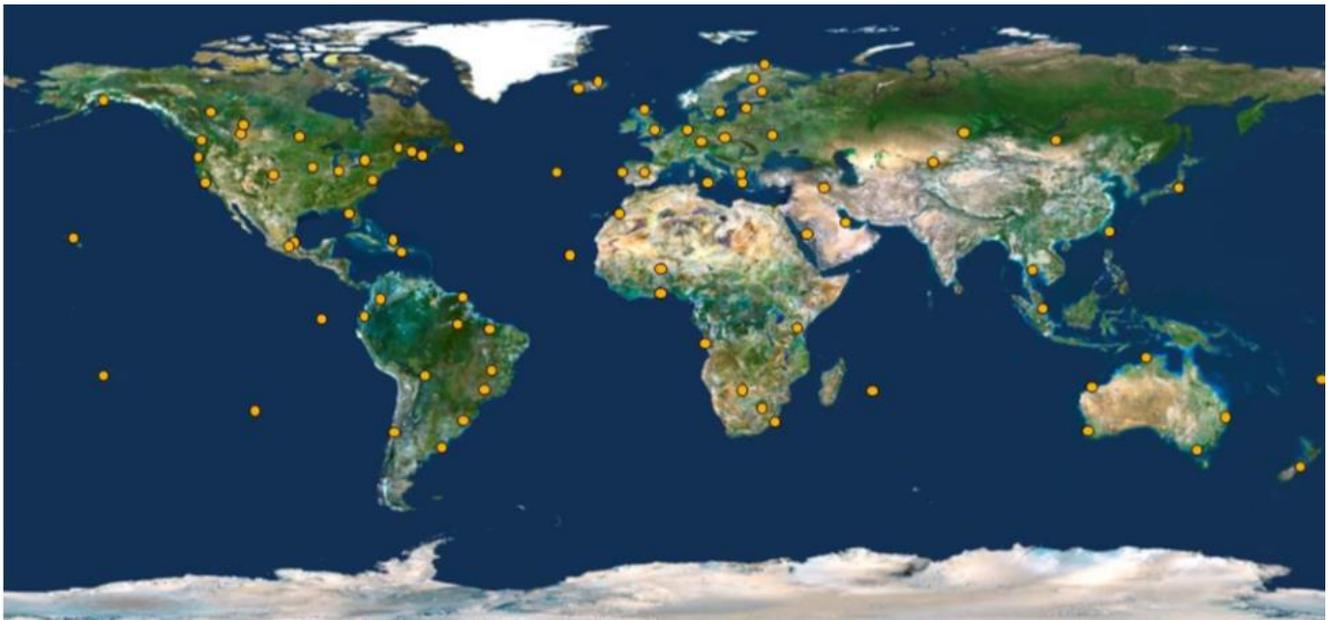
Na técnica de posicionamento PPP-RTK do Sistema Trimble Centerpoint RTX, é utilizado um método para solucionar as ambigüidades como um valor inteiro proposto por Leandro et al. (2011) denominado de *divergence free phase combination*, onde são utilizadas combinações entre as observáveis de código de uma frequência particular e, as observáveis da fase da onda portadora nas duas frequências. Deste modo, nesta metodologia os dados da Fase da onda portadora são

combinados de forma específica para anular os efeitos geométricos e ionosféricos das pseudodistâncias observadas numa dada frequência.

E, sem dúvida nenhuma, esta técnica apresenta vantagens em relação às outras técnicas de posicionamento GNSS em tempo real, tais como DGPS e RTK, visto que requer a utilização de somente um receptor ao nível de usuário. Porém, requer a modelagem precisa de praticamente todos os efeitos sistemáticos envolvidos com a propagação dos sinais GNSS e efeitos geodinâmicos relacionados com as estações, além da disponibilidade de órbitas precisas e correções de relógios em tempo real, o que no Sistema Trimble Centerpoint RTX, é realizado através de uma Rede Geodésica GNSS a nível global, composta de 107 estações de referência distribuídas ao redor do planeta – sendo 7 estações no Brasil.

Estas estações – equipadas com receptores Trimble NetR5, NetR8 e NetR9, os quais rastreiam os satélites das constelações GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo) (Doucet et al, 2017) – transmitem dados em tempo real para os dois Centros de Controle Trimble RTX, um localizado nos Estados Unidos e o outro na Europa. Correções precisas são geradas nestes dois Centros de Controle e transmitidas para os usuários, permitindo que os mesmos executem posicionamento em tempo real, com acurácia centimétrica. A Figura 1 mostra a distribuição das estações da rede de rastreamento Trimble RTX ao redor do mundo.

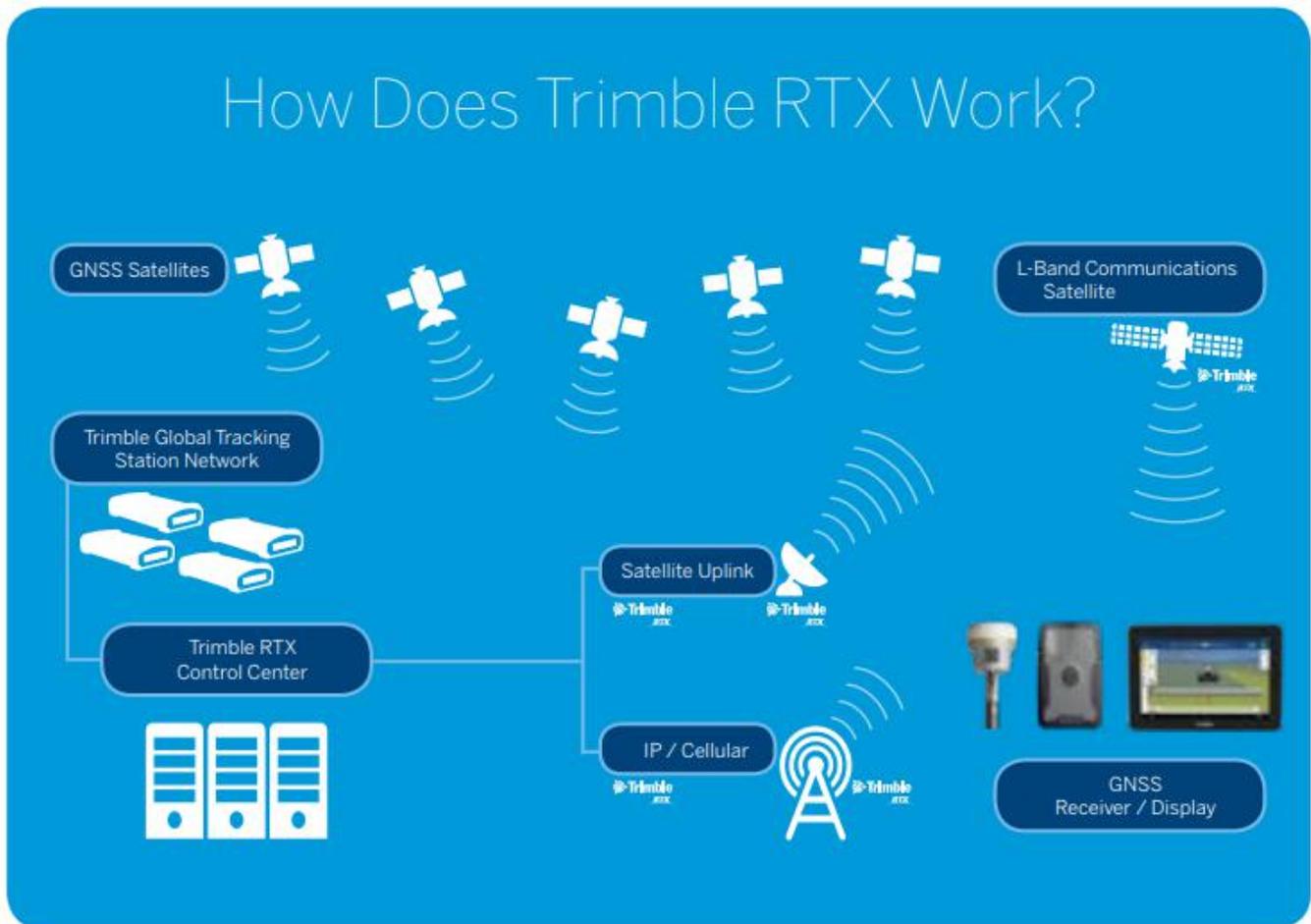
Figura 1 – Rede de Rastreamento Trimble RTX.



Fonte: Leandro et al. (2011)

A Figura 2 ilustra o funcionamento da técnica de posicionamento PPP-RTK do Sistema Trimble Centerpoint RTX.

Figura 2 – Funcionamento do Trimble Centerpoint RTX.



Fonte: Brandi (2014)

A rede de estações de referência ao redor do mundo transmite dados via internet para os dois Centros de Controle do Centerpoint RTX. Nesses centros, os dados dessa rede global são utilizados para calcular as correções referentes aos erros de relógio dos satélites, erros de órbita, tendências (*bias*) e, por fim, os erros provocados pela propagação dos sinais na atmosfera. Os modelos têm representação global e podem ser utilizados por qualquer receptor móvel em qualquer lugar do planeta. Por fim, os usuários podem receber as correções por meio de receptores GNSS que possuam banda L ou acessem a internet.

2.2 Sistema Geodésico de Referência

No Posicionamento PPP-RTK com utilização do Serviço Trimble Centerpoint RTX, as coordenadas determinadas estão no sistema de referência/realização ITRF vigente na época do levantamento, ou seja, ITRF2014. Porém, atividades geodésicas desenvolvidas no território nacional, conforme os padrões estabelecidos pelas tecnologias atuais devem estar referenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), cujo sistema geodésico de referência é o SIRGAS em sua realização do ano de 2000 (SIRGAS2000), época 2000,4, sendo o mesmo baseado no ITRF2000.

Deste modo, a transformação das coordenadas determinadas pelo Serviço Trimble Centerpoint RTX na época atual (época do rastreamento) ITRF2014 para outro sistema de referência com uma época diferente se dá através do modelo de placa tectônica MORVEL56. O NNR-MORVEL56 constitui um conjunto de velocidades angulares que descreve o movimento de 56 placas tectônicas relativas a um único referencial no qual a condição NNR (No Net Rotation) da litosfera é determinada (Argus et al., 2011).

2.3 Solução de Ambiguidades no PPP-RTK do Sistema Trimble Center Point RTX

No método proposto por Leandro et al. (2011) para solucionar as ambigüidades como um valor inteiro – denominado de *divergence free phase combination*, são utilizadas combinações entre as observáveis de código de uma frequência particular e, as observáveis da fase da onda portadora nas duas frequências. Deste modo, nesta metodologia os dados da Fase da onda portadora são combinados de forma específica para anular os efeitos geométricos e ionosféricos das pseudodistâncias observadas numa dada frequência. A formulação matemática da *divergence free phase combination* (dfpc) com a observável de código é dada por Leandro et al. (2011):

$$\Phi_{df,i} = \frac{f_i^2 + f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \Phi_i - \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \Phi_j \quad (1)$$

Onde:

f_i^2 Representa a frequência GNSS i em MHz;

f_j^2 Representa a frequência GNSS j em MHz; e

Φ_i É a observável da Fase da Portadora para a frequência i em metros;

Φ_j É a observável da Fase da Portadora para a frequência j em metros.

Aplicando-se a Equação (1), na equação (2) de observação da fase da onda portadora:

$$\Phi_i = \rho + c(dT - dt) + T - I_i + \lambda_i N_i + A_i - a_i + \frac{w_{\Phi} - w_{\Phi}}{\lambda_i} + B_{\Phi,i} - b_{\Phi,i} + M_{\Phi,i} + n_{\Phi,i} \quad (2)$$

têm-se a *divergence free phase combination*:

$$\Phi_{df,i} = \rho + c(dT - dt) + T + I_i + \lambda_{df,i} N_{df,i} + B_{\Phi,df,i} - b_{\Phi,df,i} + M_{\Phi,df,i} + n_{\Phi,df,i} \quad (3)$$

Onde:

ρ é a distância geométrica entre as antenas do satélite e do receptor;

c é a velocidade da luz em m/s;

dT é o erro do relógio do receptor;

dt é o erro do relógio satélite;

T é o erro causado pela refração troposférica;

I_i é o erro causado pela refração inosférica;

$\lambda_{df,i}$ é o comprimento de onda da Fase da Portadora advinda da *divergence free phase*;

$N_{df,i}$ é a ambigüidade inteira da Fase da Portadora, proveniente da *divergence free phase*, expressa em ciclos;

$B_{\Phi,df,i}$ é a tendência da Fase da Portadora do receptor, proveniente da *divergence free phase*, expresso em metros;

$b_{\Phi,df,i}$ é a tendência da Fase da Portadora do satélite, proveniente da *divergence free phase*, expresso em metros;

$M_{\Phi,df,i}$ é o multicaminho da Fase da Portadora, proveniente da *divergence free phase*, expresso em metros;

$n_{\Phi,df,i}$ é o ruído da pseudodistância e outros efeitos não modelados, para a frequência i , proveniente da *divergence free phase*, expresso em metros.

Finalmente, fazendo a combinação da equação da observação da Pseudodistância (MONICO, 2008, p. 186) com a equação (3) da *divergence free phase combination*, tem-se:

$$\Phi_{df,i} - P_i = \lambda_{df,i} N_{df,i} + B_{\Phi,df,i} - b_{\Phi,df,i} + M_{\Phi,df,i} + n_{\Phi,df,i} - B_{P,i} + b_{P,i} - M_{P,i} - n_{P,i} \quad (4)$$

Onde:

$B_{P,i}$ é o atraso de hardware para o receptor na frequência i ;

$b_{P,i}$ é o atraso de hardware para o satélite para na frequência i ;

$M_{P,i}$ é o erro causado pelo multicaminhamento;

$n_{P,i}$ é o resíduo da pseudodistância contendo os erros não modelados.

Por meio da equação (4), observa-se que esta combinação oferece a possibilidade de trabalhar com as observações de código obtidas por uma única frequência, uma vez que os comprimentos de onda obtidos da *divergence free phase combination* são muito curtos (Leandro et al., 2011).

2.4 Modelos Matemáticos Implementados no Sistema TRIMBLE CENTER POINT RTX

Os principais modelos matemáticos implementados no Sistema Trimble Centerpoint RTX para eliminar e/ou minimizar os efeitos sistemático na Técnica de Posicionamento PPP-RTK são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos Matemáticos Implementados no Sistema Trimble Centerpoint RTX

Efeito	Estratégia
Ionosfera	Combinação ion-free (Wide-Lane e Narrow-Lane)
	Modelo Estocástico
Troposfera	Hopfield; Saastamoinen; UNB3; UNB3m + GPT
Carga de marés oceânicas	Aplicadas conforme modelagem matemática em McCARTHY e PETIT, 2003
Marés terrestres	Modelos descritos pelo IERS 2003 (McCARTHY; PETIT, 2003)
Efeito PCV (Phase Center Variation) receptor e satélite	Varição absoluta do centro de fase das antenas (PCO e PCV). Modelagem matemática conforme Rothacher and Schmid (2010)
Órbitas	Obtidas por meio do processamento dos dados compactados armazenados pelo servidor de sistema de tempo real do Trimble Centerpoint RTX (Leandro et al., 2011)
Correção do erro do relógio do satélite	Obtida por meio do processamento dos dados compactados armazenados pelo servidor de sistema de tempo real do Trimble Centerpoint RTX (Leandro et al., 2011)
Ambigüidades	Solução fixa
Fase wind-up	Aplicado
Efeito de relatividade	Aplicado
Movimento do Pólo	Aplicado conforme modelagem matemática descrita em Petit e Luzum (2010).

Fonte: Traduzido e adaptado de Doucet et al. (2017).

Para estimar as órbitas dos satélites, o sistema Trimble CenterPoint RTX utiliza o Filtro de Kalman, onde as mesmas são modeladas juntamente com outras forças dinâmicas em conexão (marés terrestres, carga oceânica, campo gravitacional da terra, pressão de radiação solar, relatividade geral, e etc.) com uma integração numérica das equações de movimento na etapa de previsão do filtro (Leandro et al, 2011). Nesta etapa são calculadas também as posições e velocidades dos satélites, troposfera e ambiguidades inteiras.

No que diz respeito aos erros dos relógios dos satélites, a velocidade de estimativa dos mesmos, é de fundamental importância, devido ao fato de que qualquer atraso no cálculo dos relógios dos satélites é traduzido diretamente em latências de correção no momento de determinação das coordenadas em tempo real do receptor. Por isto, a arquitetura do processador é baseada em um design inovador que permite o processamento de dados de várias centenas de estações de referência, incluindo todas as etapas necessárias, como controle de qualidade de dados, resolução de ambigüidade e geração final do relógio, em uma fração de segundo.

Desta forma, o tempo de processamento da rede em tempo real é minimizado ao máximo possível, permitindo que o processador opere em 1 Hz, diminuindo significativamente a latência de correção final no receptor do usuário. Mais detalhes podem ser vistos em Leanro et al. (2011); Zhang et al. (2013) e Doucet et al. (2017).

2.5 Análise Estatística

Para avaliação do desempenho do posicionamento GNSS PPP-RTK com o Serviço Trimble CenterPoint RTX, em termos de acurácia, foram analisadas a existência de tendências e a precisão das coordenadas obtidas por meio deste Serviço. A precisão está ligada com a dispersão das observações em torno do valor médio, enquanto que a acurácia (ou exatidão) está relacionada com a proximidade do valor real, ou seja, sem a influência de erros sistemáticos (Galo & Camargo, 1994). Sendo assim, na análise da acurácia estes dois aspectos devem ser considerados. Para análise de tendências utiliza-se o teste *t* de student, enquanto a precisão é examinada por meio do teste Qui-Quadrado.

Na sequência serão descritos os procedimentos para a análise de tendência e precisão baseadas em Merchant (1982), e aplicadas por Galo e CamargoO (1994).

2.5.1 Análises de Tendências

A análise da acurácia com o Serviço Trimble CenterPoint RTX, Técnicas PPP-RTK e PPP convencional, é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas obtidas por meio do levantamento GNSS – com correções RTX – e as coordenadas de referência, calculada para cada ponto *i* por:

$$\Delta X_i = X_i - X_i^r \quad (5)$$

A média e o desvio padrão das discrepâncias amostrais são calculadas por:

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (6)$$

$$S_{\Delta X}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2 \quad (7)$$

No teste de tendência podem ser avaliadas as seguintes hipóteses:

$$H_0: \overline{\Delta X} = 0; \quad H_1: \overline{\Delta X} \neq 0 \quad (8)$$

Onde:

H_0 : corresponde a hipótese básica;

H_1 : corresponde a hipótese alternativa.

Em seguida, calcula-se a estatística amostral t , e verifica-se se a mesma encontra-se dentro do intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese básica. O cálculo da estatística amostral (t_x) é dado por:

$$t_X = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} n^{1/2} \quad (9)$$

$$|t_X| < t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} \quad (10)$$

Onde:

n : número de amostras;

α : nível de significância.

Se a estatística t amostral, não satisfaz a desigualdade, rejeita-se a hipótese básica, ou seja, as coordenadas possuem tendência significativa para um determinado nível de confiança. A detecção de tendência em alguma direção informa a ocorrência de problemas de natureza sistemática. De acordo com Galo e Camargo (1994), as causas para ocorrência destes problemas podem ser as mais variadas, mas uma vez conhecidas, os seus efeitos podem ser minimizados pela subtração de seu valor a cada coordenada obtida por meio do posicionamento GNSS com o uso do Serviço Trimble CenterPoint RTX. Mais detalhes podem ser vistos também em Monico et al. (2009).

2.5.2 Análise de Precisão

A análise da precisão consiste em verificar, a partir de amostras de discrepâncias se o valor do desvio-padrão populacional estimado é estatisticamente menor do que um determinado valor limite de precisão pré-estabelecido, ou Erro Padrão (EP) esperado. Neste trabalho, utilizar-se-á como base metodológica o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), estabelecido através do Decreto nº 89.817 de 20 de Junho de 1984, que estabelece critérios para classificação de cartas quanto à sua exatidão e à distribuição de erros nas mesmas, utilizando um indicador estatístico da qualidade posicional denominado de PEC. A Figura 3 mostra os valores de PEC Planimétrico e Altimétrico para as escalas: 1/1000, 1/2000 e 1/5000.

Figura 3 – PEC Planimétrico e Altimétrico.

Planimétrico							Altimétrico						
PEC PCD	1:1000		1:2000		1:5000		PEC PCD	1:1000		1:2000		1:5000	
	PEC	E.P	PEC	E.P	PEC	E.P		Equid.: 1 m	Equid.: 1 m	Equid.: 2 m	Equid.: 2 m	PEC	E.P
A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67
B	0,50	0,30	2,00	0,60	2,50	1,50	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80
C	0,80	0,50	1,00	4,00	4,00	2,50	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00
D	1,00	0,60	1,20	5,00	5,00	3,00	D	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20

Fonte: Adaptado de CONCAR (2011).

Deste modo, seguindo os procedimentos aplicadas por Galo e Camargo (1994), a análise da precisão, pode ser feita comparando-se o desvio-padrão das discrepâncias com o Erro Padrão (EP) esperado, o qual para este trabalho será obtido pela PEC-PCD, para uma determinada classe e escala analisada, conforme observado pela Figura 3.

Portanto o teste de hipótese a ser formulado é o seguinte:

$$H_0: S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2, \text{ contra } H_1: S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2 \quad (11)$$

O termo $S_{\Delta X}$ corresponde ao desvio-padrão esperado para a coordenada X, que nada mais é do que o o Erro Padrão esperado para aquela classe. Considerando que o o Erro Padrão é fixado não para uma coordenada, mas para a resultante, considera-se para os testes planimétricos:

$$\sigma_X = \frac{EP}{\sqrt{2}} \cdot \quad (12)$$

Uma vez calculada a variância esperada pode-se calcular a seguinte estatística:

$$\chi_X^2 = (n - 1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (13)$$

e verificar se o valor acima calculado está no intervalo de aceitação, ou seja:

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \cdot \quad (14)$$

Se a expressão anterior não for obedecida, rejeita-se a hipótese (H_0) de que a as coordenadas obtidas por meio do posicionamento GNSS com a utilização do Serviço Trimble CenterPoint RTX atendam a precisão pré-estabelecida. No caso da análise ser feita, não sobre as componentes, mas sobre as resultantes, a equação (12) fica mais simples: $S_{\Delta X} = EP$.

2.5.3 Medida de Acurácia

De acordo com Monico et al. (2009), a medida de acurácia a pode também ser dada como a tendência b associada com sua precisão σ_x , ou seja:

$$a = b \pm \sigma_x \quad (15)$$

Onde:

σ_x representa a precisão da média amostral, dado por:

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (16)$$

Em que:

σ é o desvio padrão populacional conhecido, numa amostra de tamanho n .

Considerando-se na equação (6), o valor de $\overline{\Delta X}$ como sendo a tendência calculada a partir das discrepâncias encontradas numa amostra de tamanho n , a medida de acurácia da equação (16) é reescrita como:

$$a = \overline{\Delta X} \pm \sigma_x \quad (17)$$

Uma outra medida de acurácia proposta por Gauss e apresentada por Mikhail e Ackermann (1976), é denominada de Erro Quadrático Médio (EQM), em inglês “mean square error” (MSE), definida por:

$$MSE = \sigma_p^2 + (b)^2 \cong \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_i^2}{n} \quad (18)$$

Onde:

σ_p^2 representa a dispersão das medidas (variância ou incerteza); e

b representa a tendência ou vício do estimador.

De acordo com Monico et al. (2009), essa expressão, para amostras grandes, é praticamente igual à média quadrática dos erros (ϵ), onde ϵ é a diferença entre um valor observado (ou medido) e o tomado como referência (conhecido).

3. Metodologia

Com o objetivo de avaliar o desempenho da Técnica de Posicionamento GNSS PPP-RTK com o uso de correções do Sistema Trimble Centerpoint RTX, realizou-se um experimento, em que foram utilizados receptores GNSS de dupla frequência do fabricante Spectra, modelo SP60, com precisão horizontal e vertical de: 3mm + 0,1ppm e 3,5mm + 0,5ppm, respectivamente. A antena deste receptor possui 240 canais, permitindo o rastreamento de todas as constelações GNSS, sendo, inclusive, compatível com a banda L para receber o serviço de correção Trimble Centerpoint RTX, podendo, portanto, realizar a técnica de posicionamento PPP-RTK.

Também selecionou-se 27 Estações Geodésicas pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), implantadas pelo IBGE; uma para cada estado da Federação, de modo que estes experimentos tivessem abrangência, representatividade e resultados à nível nacional. As coordenadas UTM, de alta precisão, no Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 destas

Estações, foram consideradas como referência no processo de análise das coordenadas obtidas nos dois primeiros experimentos. As Estações Geodésicas utilizadas neste trabalho são àquelas que compõem às Redes:

- a. Altimétrica: Referência de Nível – RN;
- b. Planimétrica: Estação de Satélites – GPS e DOPPLER;
- c. Planimétrica: Estação Poligonal – EP;
- d. Gravimétrica: Estação Gravimétrica – EG.

Na cidade de Teresina – PI adicionou-se uma estação denominada ‘Estação independente’, e, foi implantada devido ao fato de que não foi localizada nenhuma Estação Geodésica do SGB neste estado. Deste modo, decidiu-se utilizar como coordenadas de referência, representativas para este estado, àquelas obtidas por meio da solução PPP-online do IBGE, com duração de 8 horas de rastreamento nesta Estação.

A Tabela 2 apresenta os nomes das Estações Geodésicas utilizadas neste trabalho, suas conexões com as Redes Geodésicas do SGB, localizações, juntamente com suas coordenadas e respectivas precisões.

Tabela 2 – Estações Geodésicas Pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro.

Estações IBGE		Estado da Federação	Coordenadas SIRGAS 2000					
Nome	Conexões		ID	E (m)	Sigma E	N (m)	Sigma N	h (m)
91267	EP SAT	AC	642777,851	0,005	8870913,433	0,003	232,130	0,029
93206	Est. GPS	AL	194880,983	0,0020	8942356,000	0,0020	78,985	0,014
96587	Est. GPS	AP	494363,690	0,0010	3461,803	0,0010	-16,854	0,002
91162	Est. GPS	AM	827255,932	0,001	9655195,259	0,001	31,930	0,002
93189	RN: 3636S	AM	562598,501	0,0020	8568735,737	0,0020	35,946	0,013
91253	Est. GPS	DF	191924,623	0,0030	8251335,709	0,0010	1065,874	0,015
92000	RN 2661V	CE	546366,259	0,0020	9585961,235	0,0040	17,726	0,018
93943	Est. GPS	ES	367012,282	0,0030	7761178,130	0,0020	-1,725	0,018
92693	Est. GPS	GO	686120,767	0,0010	8156714,794	0,0010	733,065	0,008
99566	Est. GPS	MA	570687,654	0,0030	9715571,850	0,0030	-10,725	0,020
92584	RN 3287N	MT	601240,730	0,045	8280522,521	0,013	252,938	0,036
93532	Est. GPS	MS	755450,632	0,0020	7737956,224	0,0020	660,653	0,016
93969	Est. GPS	MG	608990,698	0,0010	7800073,449	0,0020	833,752	0,007
93863	Est. GPS	PA	394096,435	0,002	9265736,850	0,003	185,011	0,011
92414	EG: 8094890	PB	295570,778	0,0020	9210259,736	0,0020	38,730	0,012
91123	RN 3279N	PR	677371,838	0,003	7183799,051	0,003	913,689	0,021
93321	RN 3675C	PE	284850,253	0,0040	9108724,188	0,0040	3,938	0,033
E1	Não há	PI	740920,947	0,003	9439228,803	0,001	40,680	0,005
91877	Est. GPS	RJ	672565,367	0,0010	7455144,456	0,0010	17,056	0,005
92435	EG: 8094857	RN	255558,920	0,0020	9354305,214	0,0020	45,879	0,016
93696	Est. GPS	RS	494164,915	0,002	6658276,574	0,002	56,088	0,02
90012	RN 9517C	RO	400642,542	0,0030	9033713,338	0,0030	97,221	0,014
90388	RN 1343D	RR	758755,117	0,0030	312040,912	0,0010	67,430	0,005
99641	Est. GPS	SC	655419,923	0,0030	6820588,593	0,0030	27,412	0,013
91619	Est. GPS	SP	323298,270	0,0030	7394410,020	0,0040	718,091	0,017
93199	Est. GPS	SE	712564,538	0,0020	8788833,280	0,0020	-4,022	0,012
92825	RN 682P	TO	751929,355	0,0030	8919729,623	0,0030	319,870	0,015

Fonte: Autoria Própria (2022).

Deste modo, realizou-se o Posicionamento GNSS com a técnica PPP-RTK, com convergências de 10, 20 e 30 minutos nestas Estações Geodésicas do SGB, utilizando para isto o receptor GNSS Geodésico SP60. A estratégia adotada em todos os estados da Federação, foi o de gravar as coordenadas obtidas exatamente em cada um dos tempos de convergência acima aludidos, independentemente das precisões alcançadas naquele exato instante. A adoção de tal estratégia deve-se ao fato de que não somente será esta a situação/realidade dos profissionais de campo no dia-a-dia de seus levantamentos, como também, teríamos análises e, conseqüentemente resultados finais mais condizentes com a realidade. Como mencionado na seção anterior, os levantamentos GNSS com a técnica de posicionamento PPP-RTK com o Sistema Trimble Centerpoint RTX, foram realizados no período de dezembro/2017 a junho/2018.

As coordenadas UTM obtidas, juntamente com as altitudes elipsoidais, ou seja, (E, N, h) de cada uma destas Estações Geodésicas e, em cada um dos períodos de convergência, são comparadas com as coordenadas de referências advindas do SGB (Tabela 2). Com isto, são calculadas as discrepâncias – em metros – para cada coordenada e seus respectivos desvios padrão. Com estas quantidades são realizadas duas análises estatísticas:

- a. Análise de Tendência, baseada no teste *t* de *Student* com 90% de confiança, para detecção de problemas de natureza sistemática;
- b. Teste Qui-Quadrado para análise da precisão, realizado com 95% de confiança.

4. Resultados e Discussões

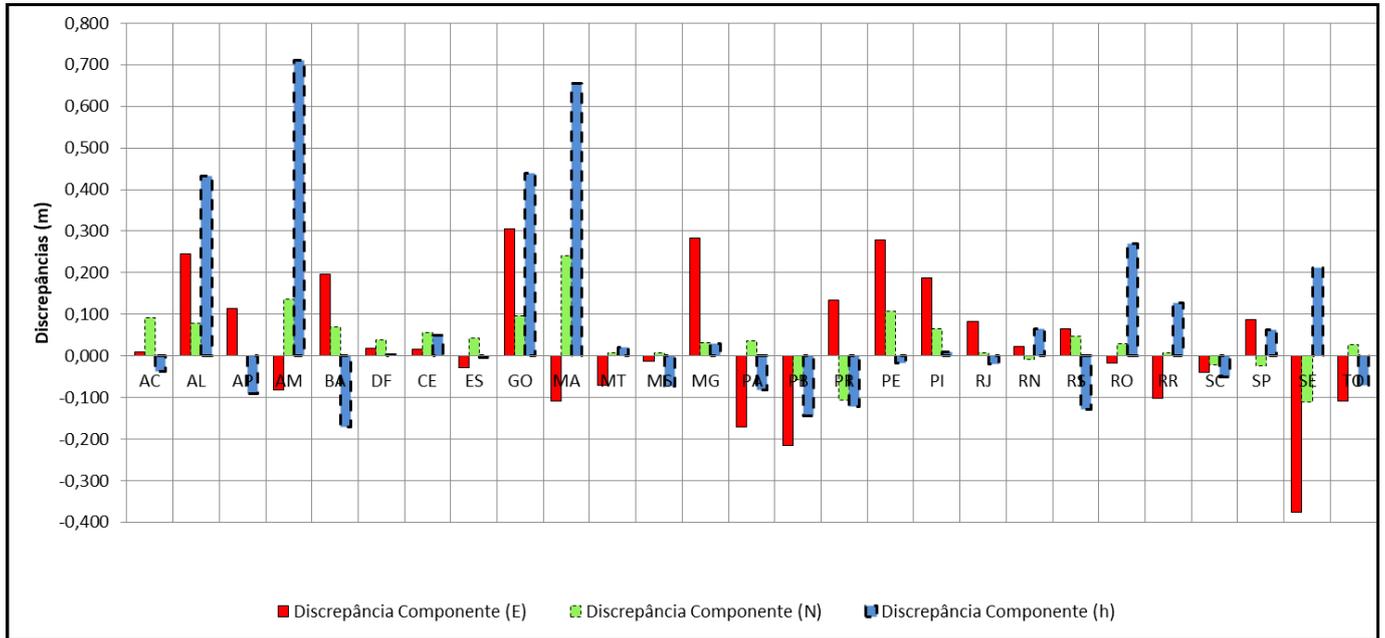
Foram analisadas a existência de tendências e a precisão das coordenadas obtidas nos experimentos realizados, uma vez que a acurácia incorpora tanto tendência – erros sistemáticos, quanto precisão – erros aleatórios (MONICO et al., 2009). Para analisar a presença de tendências nos dados utilizou-se o teste *t* de student, com nível de confiança α de 95%. Já a análise da precisão foi executada com o teste Qui-Quadrado, também com nível de confiança α de 95%.

Para a consecução destes testes estatísticos foram calculadas as diferenças/discrepâncias entre as coordenadas obtidas pelo Posicionamento GNSS PPP-RTK com o uso do Sistema Trimble Centerpoint RTX e as coordenadas de referências, bem como, as médias destas discrepâncias e os seus respectivos desvios padrão.

4.1 Análise da Acurácia com o Tempo de Convergência de 10 Minutos

O Gráfico 1 mostra as discrepâncias calculadas entre as coordenadas obtidas pela Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com o serviço de correção Trimble Centerpoint RTX – convergência de 10 minutos, e as coordenadas de Referência, provenientes das Estações Geodésicas do SGB (Tabela 2).

Gráfico 1 – Discrepâncias Calculadas Entre as Coordenadas Obtidas pelo PPP-RTK [Convergência de 10 Minutos] e as de Referência.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Por meio do Gráfico 1, novamente verifica-se discrepâncias muito significativas na componente altimétrica (h), observadas nas Estações Geodésicas 91162 (Amazonas) e 99566 (Maranhão), ambas maiores que 0,50m. Em todas as outras Estações Geodésicas, as discrepâncias calculadas foram menores que 0,50m para todas as 3 componentes.

A Tabela 3 mostra as médias das discrepâncias das coordenadas, bem como, a análise do teste *t* de Student, com nível de confiança α de 95%, para verificação da presença de tendências nos dados para o tempo de convergência de 10 minutos.

Tabela 3 – Análise do Teste *t* de Student.

Análise de Tendência	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
Média das Discrepâncias ($\overline{\Delta X}$)	0,026m	0,033m	0,077m
Variância ($S_{\Delta X}^2$)	0,015m ²	0,007m ²	0,054m ²
Desvio Padrão ($S_{\Delta X}$)	0,122m	0,085m	0,233m
Estatística Amostral (t_x)	1,118	2,022	1,711
T _{95%} Tabelado	2,056	2,056	2,056
Resultado do Teste	Aceita	Aceita	Aceita

Fonte: Autoria Própria (2022).

Por meio da Tabela 3, observa-se que as hipóteses nulas (teste *t* Student) para cada uma das componentes analisadas (E, N) e h, foram aceitas. Deste modo, as coordenadas obtidas com a Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com uso do serviço de correção Trimble Centerpoint RTX, com convergência de 10 minutos, não apresentaram tendências – efeitos sistemáticos.

Logo em seguida, realizou-se a análise da precisão por meio do teste Qui-Quadrado, ao nível de confiança α de 95%, conforme descrito na seção 2, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise do Teste Qui-Quadrado na Escala 1/1000

Parâmetros	PEC-PCD Classe A		
	Coord. E	Coord. N	Coord. h
Valor de χ^2_X amostral	26,990	12,595	12,636
Estatística $\chi^2_{(n-1; \alpha)}$	38,885	38,885	38,885
Resultado do Teste: Hipótese H_0 aceita?	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autoria Própria (2022).

Verifica-se por meio da Tabela 4 que aceitaram-se as hipóteses nulas (teste Qui-Quadrado) na escala 1/1000 para as componentes E,N e h. Ou seja, a planimetria e a altimetria atingiram um Padrão de Exatidão Cartográfica PEC-PCD classe A, escala 1/1000. Observa-se por meio da Figura 3 que o Erro Padrão Planimétrico (EP) esperado, do PEC-PCD, para Classe A, 1/1000, é de 0,17m, portanto, inferior ao padrão de precisão estabelecido pelo INCRA para vértices situados em limites artificiais, que é de melhor ou igual a 0,50m.

Calculou-se também o Erro Quadrático Médio (EQM) horizontal, resultando em 0,149m, sendo portanto menor que 0,17m – que corresponde ao Erro Padrão Planimétrico (EP) esperado, do PEC-PCD, para Classe A, 1/1000, o que corrobora com os resultados vistos na Tabela 4. Salienta-se que o EQM é um valor representativo de acurácia, apresentado por Mikhail e Ackermann (1976).

Uma vez que não foram encontradas tendências – efeitos sistemáticos, significativos nos dados analisados, e que os mesmos atingiram o Padrão de Exatidão Cartográfica PEC-PCD classe A, para a escala 1/1000, procedeu-se à estimativa das medidas de acurácia das coordenadas E,N e h, obtidas por meio da Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com uso das correções advindas do serviço Trimble Centerpoint RTX. Estas medidas podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo das Medidas de Tendência, Precisão e Acurácia: PPP-RTK.

Componente	Tendência (m)	Precisão (m)	Acurácia final (m)
E	0,026	0,019	0,026 ± 0,019
N	0,033	0,019	0,033 ± 0,019
h	0,077	0,031	0,077 ± 0,031
Horizontal (E,N)			0,042 ± 0,027

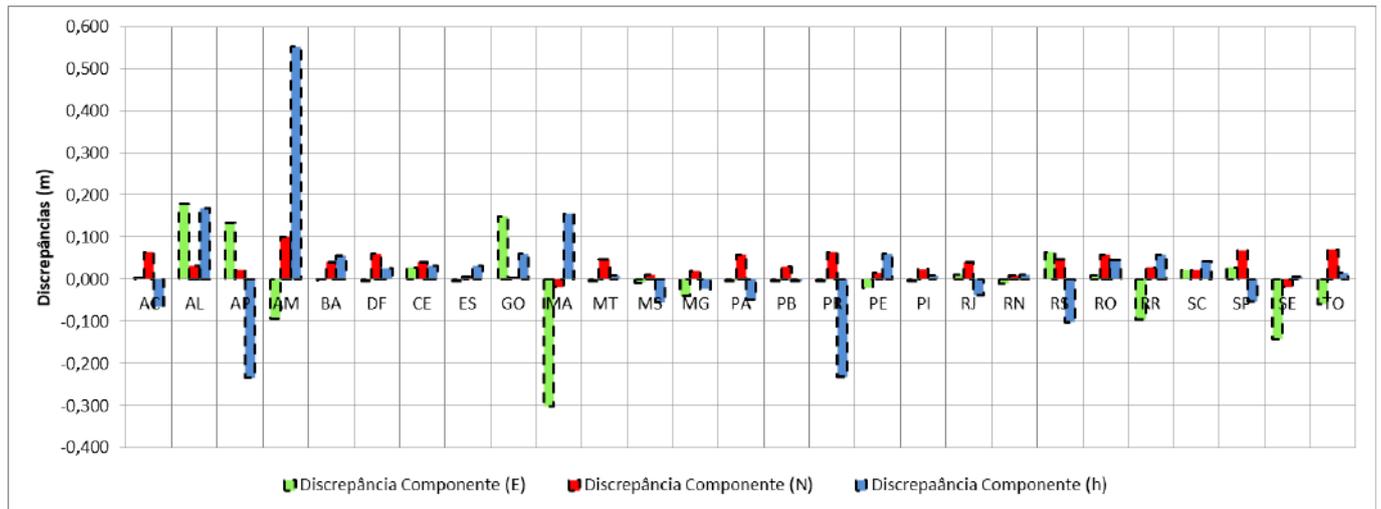
Fonte: Autoria Própria (2022).

Observa-se, novamente, que o Erro Quadrático Médio (EQM) horizontal de 0,149m, o qual oferece um único valor representativo de acurácia, ficou muito acima da incerteza da incerteza da Acurácia Final horizontal (E,N), observado na Tabela 5 (linha 5, coluna 4).

4.2 Análise da Acurácia com o Tempo de Convergência de 20 Minutos

O Gráfico 2 mostra as discrepâncias calculadas entre as coordenadas obtidas pela Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com o serviço de correção Trimble Centerpoint RTX – convergência de 20 minutos, e as coordenadas de Referência, provenientes das Estações Geodésicas do SGB (Tabela 2).

Gráfico 2 – Discrepâncias Calculadas Entre as Coordenadas Obtidas pelo PPP-RTK [Convergência de 20 Minutos] e as de Referência.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Por meio do Gráfico 2, verifica-se uma discrepâncias significativa na componente altimétrica (h), observada na Estação Geodésica 91162 (Amazonas), com magnitude de 0,553m. Em todas as outras Estações Geodésicas, as discrepâncias calculadas foram menores que 0,50m para todas as 3 componentes.

Na Tabela 6 mostra-se a análise do teste *t* de student, com nível de confiança α de 95%, para verificação da presença de tendências nas coordenadas analisadas para um tempo de convergência de 20 minutos

Tabela 6 – Análise do Teste *t* de Student.

Análise de Tendência	ΔE	ΔN	Δh
Média das Discrepâncias ($\overline{\Delta X}$)	-0,007m	0,035m	0,018m
Variância ($S_{\Delta X}^2$)	0,008m ²	0,001m ²	0,019m ²
Desvio Padrão ($S_{\Delta X}$)	0,091m	0,028m	0,139m
Estatística Amostral (t_x)	-0,381	6,481	0,669
T _{95%} Tabelado	2,056	2,056	2,056
Resultado do Teste	Aceita	Rejeita	Aceita

Fonte: Autoria Própria (2022).

Por meio da Tabela 6, observa-se que as hipóteses nulas (teste *t* Student) para as componentes analisadas E e h, foram aceitas, enquanto que para a componente N foi rejeitada. Deste modo, as coordenadas obtidas com a Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com uso do serviço de correção Trimble Centerpoint RTX, com convergência de 20 minutos, não apresentaram tendências – efeitos sistemáticos – para as componentes E e h. Porém, foi verificada tendência na componente N, que pode ser eliminada subtraindo-se de cada coordenada lida o valor da discrepância nesta direção (Galo & Camargo, 1994).

Os resultados da análise da precisão por meio do teste Qui-Quadrado, ao nível de confiança α de 95%, podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise do Teste Qui-Quadrado na Escala 1/1000.

Parâmetros	PEC-PCD Classe A		
	Coord. E	Coord. N	Coord. h
Valor de χ^2_X amostral	14,394	1,799	4,446
Estatística $\chi^2_{(n-1; \alpha)}$	38,885	38,885	38,885
Resultado do Teste: Hipótese H_0 aceita?	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autoria Própria (2022).

Verifica-se por meio da Tabela 7 que aceitaram-se as hipóteses nulas (teste Qui-Quadrado) na escala 1/1000 para as componentes E,N e h. Ou seja, a planimetria e a altimetria atingiram um Padrão de Exatidão Cartográfica PEC-PCD classe A, escala 1/1000. Observa-se por meio da Figura 3 que o Erro Padrão Planimétrico (EP) esperado, do PEC-PCD, para Classe A, 1/1000, é de 0,17m, portanto, inferior ao padrão de precisão estabelecido pelo INCRA para vértices situados em limites artificiais, que é de melhor ou igual a 0,50m.

Calculou-se também o Erro Quadrático Médio (EQM) horizontal, resultando em 0,100m, sendo portanto menor que 0,17m – que corresponde ao Erro Padrão Planimétrico (EP) esperado, do PEC-PCD, para Classe A, 1/1000, o que corrobora com os resultados vistos na Tabela 7.

Uma vez realizada a análise de tendências nas coordenadas, e verificado que as mesmas atingiram o Padrão de Exatidão Cartográfica PEC-PCD classe A, para a escala 1/1000, procedeu-se à estimativa das medidas de acurácia das coordenadas E,N e h, obtidas por meio da Técnica de Posicionamento PPP-RTK, utilizando correções advindas do serviço Trimble Centerpoint RTX, com convergência de 20 minutos. Estas medidas podem ser vistas na Tabela 8

Tabela 8 – Resumo das Medidas de Tendência, Precisão e Acurácia: PPP-RTK.

Componente	Tendência (m)	Precisão (m)	Acurácia final (m)
E	-0,007	0,008	-0,007 ± 0,008
N	0,035	0,008	0,035 ± 0,008
h	0,018	0,015	0,018 ± 0,015
Horizontal (E,N)			0,036 ± 0,011

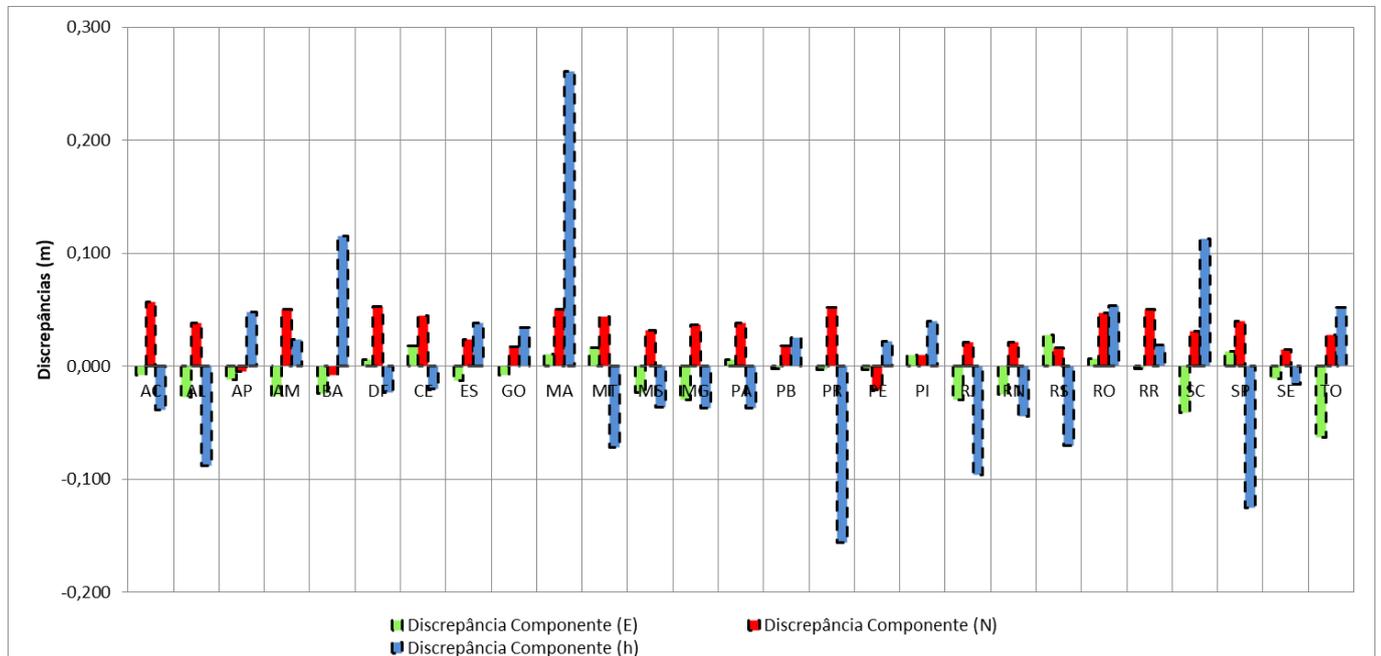
Fonte: Autoria Própria (2022).

Observa-se, novamente, que o Erro Quadrático Médio (EQM) horizontal de 0,100m, o qual oferece um único valor representativo de acurácia, ficou muito acima da incerteza da Acurácia Final horizontal (E,N), observado na Tabela 8 (linha 5, coluna 4).

4.3 Análise da Acurácia com o Tempo de Convergência de 30 Minutos

O Gráfico 3 mostra as discrepâncias calculadas entre as coordenadas obtidas pela Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com o serviço de correção Trimble Centerpoint RTX – convergência de 20 minutos, e as coordenadas de Referência, provenientes das Estações Geodésicas do SGB (Tabela 2).

Gráfico 3 – Discrepâncias Calculadas Entre as Coordenadas Obtidas pelo PPP-RTK [Convergência de 30 Minutos] e as de Referência.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Por meio do Gráfico 3, verifica-se que as discrepâncias em todas as Estações Geodésicas, foram menores que 0,50m para todas as 3 componentes. Sendo que o valor máximo é verificado para a componente altimétrica (h) na Estação 99566 (Maranhão), com valor de 0,261m.

Na Tabela 9 mostra-se a análise do teste *t* de student, com nível de confiança α de 95%, para verificação da presença de tendências nas coordenadas analisadas para um tempo de convergência de 30 minutos.

Tabela 9 – Análise do Teste *t* de Student.

Análise de Tendência	ΔE	ΔN	Δh
Média das Discrepâncias ($\overline{\Delta X}$)	-0,009m	0,030m	-0,001m
Variância ($S_{\Delta X}^2$)	0,0005m ²	0,0004m ²	0,007m ²
Desvio Padrão ($S_{\Delta X}$)	0,023m	0,020m	0,084m
Estatística Amostral (t_x)	-1,975	7,698	-0,032
T _{95%} Tabelado	2,056	2,056	2,056
Resultado do Teste	Aceita	Rejeita	Aceita

Fonte: Autoria Própria (2022).

Por meio da Tabela 9, observa-se que as hipóteses nulas (teste *t* Student) para as componentes analisadas E e h, foram aceitas, enquanto que para a componente N foi rejeitada. Deste modo, as coordenadas obtidas com a Técnica de Posicionamento PPP-RTK, com uso do serviço de correção Trimble Centerpoint RTX, com convergência de 30 minutos, não apresentaram tendências – efeitos sistemáticos – para as componentes E e h. Porém, foi verificada tendência na componente N, que pode ser eliminada subtraindo-se de cada coordenada lida o valor da discrepância nesta direção (GALO e CAMARGO, 1994).

Os resultados da análise da precisão por meio do teste Qui-Quadrado, ao nível de confiança α de 95%, podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise do Teste Qui-Quadrado na Escala 1/1000.

Parâmetros	PEC-PCD Classe A		
	Coord. E	Coord. N	Coord. h
Valor de χ_X^2 amostral	0,225	0,180	1,638
Estatística $\chi_{(n-1; \alpha)}^2$	38,885	38,885	38,885
Resultado do Teste: Hipótese H₀ aceita?	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autoria Própria (2022).

Verifica-se por meio da Tabela 10 que aceitaram-se as hipóteses nulas (teste Qui-Quadrado) na escala 1/1000 para as componentes E,N e h. Ou seja, a planimetria e a altimetria atingiram um Padrão de Exatidão Cartográfica PEC-PCD classe A, escala 1/1000. Observa-se por meio da Figura 3 que o Erro Padrão Planimétrico (EP) esperado, do PEC-PCD, para Classe A, 1/1000, é de 0,17m, portanto, inferior ao padrão de precisão estabelecido pelo INCRA para vértices situados em limites artificiais, que é de melhor ou igual a 0,50m.

Calculou-se também o Erro Quadrático Médio (EQM) horizontal, resultando em 0,042m, sendo portanto menor que 0,17m – que corresponde ao Erro Padrão Planimétrico (EP) esperado, do PEC-PCD, para Classe A, 1/1000, o que corrobora com os resultados vistos na Tabela 10.

Uma vez realizada a análise de tendências nas coordenadas, e verificado que as mesmas atingiram o Padrão de Exatidão Cartográfica PEC-PCD classe A, para a escala 1/1000, procedeu-se à estimativa das medidas de acurácia das

coordenadas E,N e h, obtidas por meio da Técnica de Posicionamento PPP-RTK, utilizando correções advindas do serviço Trimble Centerpoint RTX, com convergência de 30 minutos. Estas medidas podem ser vistas na Tabela 11.

Tabela 11 – Resumo das Medidas de Tendência, Precisão e Acurácia: PPP-RTK.

Componente	Tendência (m)	Precisão (m)	Acurácia final (m)
E	-0,009	0,005	-0,009 ± 0,005
N	0,030	0,005	0,030 ± 0,005
h	-0,001	0,016	-0,001 ± 0,016
Horizontal (E,N)			0,031 ± 0,007

Fonte: Autoria Própria (2022).

Observa-se, novamente, que o Erro Quadrático Médio (EQM) horizontal de 0,042m, o qual oferece um único valor representativo de acurácia, ficou próximo da incerteza da Acurácia Final horizontal (E,N), observado na Tabela 11 (linha 5, coluna 4)..

4.4 Análise Geral Correlacionada

A acurácia da Técnica de Posicionamento GNSS PPP-RTK, através de correções advindas do serviço Trimble Centerpoint RTX, segundo especificação do fabricante, tende a aumentar conforme o aumento do tempo de convergência. Deste modo, com tempo de convergência próximo de 20 minutos, a acurácia horizontal esperada é de 0,025m, cuja especificação é baseada no desempenho de campo em 95% do tempo de rastreamento, conforme observado pelo Quadro 1

Quadro 1 - Desempenho do Serviço de Correção Trimble Centerpoint RTX.

Correction Service	Horizontal accuracy (cm)	Vertical Accuracy (cm)	Initialization (mins) ¹ Fast / Standard
CenterPoint® RTX			
RMS	2 cm	5 cm	<1 / <15
95%	2.5 cm	-	<2 / <20

Fonte: Trimbe (2022).

Sendo assim, neste trabalho, avaliou-se a acurácia alcançada pela Técnica de Posicionamento GNSS PPP-RTK, através de correções advindas do serviço Trimble Centerpoint RTX, com diferentes tempos de convergências (10, 20 e 30 minutos), em levantamentos realizados em todos os estados da Federação. Deste modo, os resultados finais à nível nacional, foram condizentes com o especificado pelo fabricante (Quadro 1), uma vez que a acurácia horizontal para o tempo de convergência de 20 minutos foi de **0,036m ± 0,011m** (Tendência e Precisão), demonstrando que a acurácia horizontal especificada pelo fabricante de 0,025m está de acordo com esta incerteza, ou seja, 0,025m é igual ao limite inferior do intervalo de incerteza: **0,036m ± 0,011m**.

Já a acurácia horizontal para o tempo de convergência de 30 minutos foi de **0,031m ± 0,007m** (Tendência e Precisão), demonstrando que a acurácia horizontal especificada pelo fabricante de 0,025m está dentro deste intervalo de incerteza. Deste modo, os resultados alcançados com convergência de 30 minutos, não somente confirmam a especificação de acurácia horizontal do fabricante, como também ratificam o princípio do serviço Trimble Centerpoint RTX: aumento da acurácia proporcional ao aumento do tempo de convergência.

De maneira geral, o desempenho da acurácia horizontal – neste trabalho – melhorou gradativamente com o aumento do tempo de convergência, verificando-se, conseqüentemente, uma diminuição de tendência (erro sistemático) e aumento de precisão.

De maneira geral, observa-se que o desempenho da acurácia horizontal – neste trabalho – melhorou gradativamente com o aumento do tempo de convergência, verificando-se, conseqüentemente, uma diminuição de tendência (erro sistemático) e aumento de precisão. Estes resultados podem ser vistos na Tabela 12.

Tabela 12 – Desempenho da Acurácia Horizontal em Função do Tempo de Convergência.

Convergência (')	Acurácia (m)
10	0,042 ± 0,027
20	0,036 ± 0,011
30	0,031 ± 0,007

Fonte: Autoria Própria (2022).

Com respeito à acurácia horizontal absoluta – representada pelo Erro Quadrático Médio (EQM), a qual consiste em analisar o grau de concordância entre as coordenadas obtidas pelo PPP-RTK e as de referência, observou-se também uma gradativa melhoria com o aumento do tempo de convergência, ou seja: 0,149m, 0,100m e 0,042m, para os tempos de convergência de 10, 20 e 30 minutos, respectivamente.

Correlacionando-se o Quadro 1 com a Tabela 12, observa-se que a acurácia horizontal preconizada pelo fabricante está de acordo com a acurácia horizontal alcançada em cada um dos tempos de convergência analisados neste trabalho.

5. Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi o de analisar o desempenho da Técnica de Posicionamento GNSS PPP-RTK, com o uso de correções advindas do Serviço Trimble Centerpoint RTX, para os tempos de convergência de 10, 20 e 30 minutos. Estes objetivos foram alcançados por meio dos levantamentos GNSS e respectivos pós-processamentos realizados, seguidos das análises estatísticas executadas.

Para utilização da Técnica de Posicionamento PPP-RTK com o Serviço Trimble CenterPoint RTX é requerido um período de inicialização, também denominado de tempo de convergência, o qual é diretamente proporcional à acurácia alcançada. Neste trabalho, investigou-se o alcance da acurácia para os tempos de convergência de 10, 20 e 30 minutos, em levantamentos realizados em todos os estados da Federação. Deste modo, os resultados finais à nível nacional, foram condizentes com o especificado pelo fabricante, uma vez que a acurácia horizontal para o tempo de convergência de 20 minutos foi de **0,036 ± 0,011** (Tendência e Precisão), demonstrando que a acurácia horizontal especificada pelo fabricante de 0,025m está de acordo com esta incerteza, ou seja, 0,025m está dentro do intervalo de incerteza: $0,036m \pm 0,011m$. Estes resultados não somente ratificam a acurácia preconizada pelo fabricante, como também demonstra que a mesma melhora gradativamente com o aumento do tempo de convergência.

Verificou-se também que a maior precisão alcançada se deu para o tempo de convergência de 30 minutos, com $\pm 0,007m$, em que também observou-se a menor tendência estimada com 0,031m. Para este tempo de convergência, alcançou-se também a menor incerteza estimada, o que não somente ratifica a acurácia preconizada pelo fabricante, como também demonstra que a mesma melhora gradativamente com o aumento do tempo de convergência. Fato este que foi confirmado pela análise da acurácia horizontal absoluta – representada pelo Erro Quadrático Médio (EQM), em que observou-se também uma

gradativa melhoria com o aumento do tempo de convergência, ou seja, 0,149m com um tempo de convergência de 10 minutos para 0,042m com um tempo de convergência de 30 minutos.

Todos os experimentos realizados neste trabalho, foram submetidos à análise de precisão, tendo como base metodológica o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Cada um dos experimentos realizados resultou inferior ao Erro Padrão Planimétrico (EP) esperado, do PEC-PCD, para a classe e escala testada que foram respectivamente: Classe A e escala 1/1000. Estes resultados mostraram-se promissores e confirmam o potencial da Técnica de Posicionamento GNSS PPP-RTK, com o uso de correções do Serviço Trimble Centerpoint RTX para o posicionamento ao nívelcentimétrico.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Santiago & Cintra Importação e Exportação LTDA pela disponibilização dos receptores GNSS, softwares e acesso ao serviço de correção Trimble CenterPoint RTX para execução desta pesquisa.

Referências

- Argus, D. F., Gordon, R. G., & Demets (2011). *Geologically current motion of 56 plates relative to the no net rotation reference frame*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 11.
- Bertiger, W., Desai, S. D., Haines, B., Harvey, N., Moore, A. W., Owen, S. & Weiss, J. P (2010). Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. *Journal of Geodesy*, 84, 10.1007/s00190-010-0371-9, 327–337.
- Blewitt, G (2006). *The fixed point theorem of ambiguity resolution for precise point positioning of GPS networks: Theory and applications*. *Eos Trans. AGU*, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G43A0977.
- Brandl, M. (2014). Advancing Trimble CenterPoint RTX by adding BeiDou and Galileo. *Proceedings of the European Navigation Conference (ENC)*, Rotterdam, The Netherlands.
- Concar, Exército Brasileiro – Concar-Eb (2011). *Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais*. 2.ed.Brasil.
- Doucet, K., Herwig, M., Kipka, A., Kreikenbohm, P., Landau, H., Leandro, R., Moessmer, M. & Pagels, C (2017). *Introducing Ambiguity Resolution in Webhosted Global Multi-GNSS Precise Positioning with Trimble RTX-PP*. <http://www.trimble.com/positioning-services/pdf/RTX_Post_Processing.pdf>. Acesso em: outubro de 2022.
- Galo, M. & Camargo, P.O. (1994). Utilização do GPS no controle da qualidade de carta. *In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*. Florianópolis, p.41-48.
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C. & Liu, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7), 10.1007/s00190-007-0187-4, p.389–399.
- Geng, J., Teferle, F., Shi, C., Meng, X., Dodson, A. & Liu, J. (2009). Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data. *GPS solutions*.
- Geng, J., Teferle, F. N., Meng, X. & Dodson, A. H. (2011). Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. *Advances in Space Research*, 47(10), 10.1016/j.asr.2010.03.030, p. 0273-1177.
- Landau, H., Glocker, M., Leandro, R., Nitschke, M., Stolz R. & Zhang F. (2012). *Aspects of using the QZSS Satellite in the Trimble CenterPoint™ RTX™ Service: QZSS Orbit and Clock Accuracy, RTX Positioning Performance Improvements*, Paper presented at IONGNSS-2012, September 17-21, Nashville, TN, USA.
- Lannes, A. & Prieur, J. L. (2014). Integer-ambiguity resolution in astronomy and geodesy. *Astronomische Nachrichten* 335:2, 198-209. Online publication date: 1-Feb-2014.
- Laurichesse, D., Mercier, F. & Berthias, J. P. (2008). *Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK*. ION NTM 2008. San Diego, California.
- Leandro, R., Landau H., Nitschke, M., Glocker, S., Seeger, X. Chen, A., Deking, M., Bem Tahar, F., Zhang, R., Stolz, N., Talbolt, G., Lu, K., Ferguson, M., Brandl, V., Gomez Pantoja & A. Kipka, Trimble TerraSat GmbH, Germany (2011). *RTX Positioning: the Next Generation of cm-accurate Real-time GNSS Positioning*, Paper presented at ION-GNSS-2011, September 20-23, 2011, Portland, OR, USA.
- Marques, H. A. (2012). *PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS*. (Tese – Doutorado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- Merchant, D. C.(1982). Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In.: *Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping* (1), 222-231.

Mervart, L., Lukes, Z., Rocken, C. & Iwabuchi, T. (2008). Precise Point Positioning With Ambiguity Resolution In Real-Time. *GPS Solutions Inc.*, Boulder CO, USA.

Mikhail, E. & Ackerman, F. (1976). *Observations and Least Squares*. University Press of America, 497 p.

Monico, J. F. G. (2008). *Posicionamento pelo GNSS – Descrição, fundamentos e aplicações*. Editora UNESP.

Monico, J. F. G., Dal Poz, A. P., Galo, M., Santos, M. C. & Oliveira, L. C. (2009). Acurácia e Precisão: Revendo os Conceitos de Forma Acurada. *Bol. Ciênc. Geod.*, sec. Comunicações, 15(3), 469-483

Petit, G. & B. Luzum. (2010) *IERS Conventions (2010)*. *IERS Technical Note 36*, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 179 pp.

Teunissen, P. J. G. & Khodabandeh, A. (2014). Review and principles of PPP-RTK methods. *Journal of Geodesy*, 89(3), 217-240.

Wübbena, G., Schmitz, M. & Bagge, A. (2005). *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), Long Beach, CA, USA, 13–16 September 2005, 2584–2594.

Zhang, F., Brandl, M. & Chen, X. (2013). Trimble CenterPoint RTX – A First Study on Supporting Galileo. Conference: *The European Navigation Conference*.