

Impacto da estimativa de gradientes horizontais troposféricos no posicionamento por ponto preciso cinemático na região brasileira

RESUMO

Lais Thuany Cardoso Theodoro
lais.thuany.lt@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6232-122X
Universidade Federal do Paraná (UFPR),
Curitiba, Paraná, Brasil.

Kauê de Moraes Vestena
kauemv2@gmail.com
orcid.org/0000-0003-1225-2371
Universidade Federal do Paraná (UFPR),
Curitiba, Paraná, Brasil.

Tiago Lima Rodrigues
tiagorodrigues@ufpr.br
orcid.org/0000-0002-3037-9037
Universidade Federal do Paraná (UFPR),
Curitiba, Paraná, Brasil.

Paulo Sérgio de Oliveira Júnior
paulo.junior@ufpr.br
orcid.org/0000-0001-7000-6924
Universidade Federal do Paraná (UFPR),
Curitiba, Paraná, Brasil.

A acurácia do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é fortemente influenciada pela modelagem do atraso troposférico, cuja representação pode ser aprimorada com a inclusão de gradientes horizontais. Este estudo comparou dois cenários do PPP cinemático: (1) com estimativa apenas do Atraso Zenital Troposférico (ZTD), e (2) com estimativa combinada do ZTD e gradientes troposféricos, utilizando o software RTKLIB e dados GNSS em diferentes regiões do Brasil através das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), processados para os meses de janeiro e julho de 2020. Os resultados, avaliados por meio do Erro Médio Quadrático (RMSE), mostraram que a inclusão de gradientes reduziu os erros horizontais em até 9 mm em estações como CUIB e ONRJ, enquanto a componente vertical (U) manteve-se como a mais sensível, com valores variando entre 0,13 m em SSA1 no verão e 0,26 m em SAGA no inverno. Melhorias modestas na componente U foram observadas em regiões equatoriais, como SAGA (+2,27% no verão) e SSA1 (+2,15% no inverno). Em contrapartida, em áreas subtropicais e de relevo elevado, como UFPR e POAL, registrou-se degradação da acurácia vertical, chegando a -3,34% em POAL no verão. De modo geral, o verão apresentou maior acurácia nas estimativas, em função da variabilidade atmosférica mais intensa associada ao longo período de rastreamento, que favorece o refinamento do ZTD pelo Filtro de Kalman estendido. Esses resultados reforçam a importância de considerar a sazonalidade e a climatologia local na escolha da modelagem troposférica, bem como o potencial de futuras abordagens baseadas em Previsão Numérica de Tempo e técnicas de aprendizado de máquina para aprimorar o PPP no território brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: Posicionamento por Ponto Preciso. Correção Troposférica. RTKLIB.

INTRODUÇÃO

O Posicionamento Por Ponto Preciso (PPP) tem se consolidado como uma técnica eficaz para a determinação de coordenadas geodésicas de alta precisão, dispensando a necessidade de estações de referência próximas. Contudo, o desempenho do PPP é sensivelmente afetado por erros sistemáticos, sendo os efeitos da troposfera um dos principais desafios (GOUVEIA et al., 2020; KOUBA e HÉROUX, 2001; OLIVEIRA, ALVES e FERREIRA, 2014; THEODORO et al., 2022). Esses efeitos tornam-se ainda mais pronunciados em regiões tropicais, como o Brasil, onde a heterogeneidade climática impõe desafios específicos (GOUVEIA et al., 2020; OLIVEIRA, ALVES e FERREIRA, 2014; THEODORO et al., 2022).

Variações locais e sazonais podem afetar significativamente a precisão do PPP, especialmente em condições de baixa elevação dos satélites. Dessa forma, a avaliação do desempenho de modelos de correção troposférica em diferentes contextos climáticos é crucial para o desenvolvimento e aprimoramento contínuo dessas metodologias de correção (ALVES et al., 2016; BOEHM et al., 2006; BRAGA e DAL POZ, 2022; DOUSA e VACLAVOVIC, 2014; GOUVEIA et al., 2020; LEANDRO, SANTOS e LANGLEY, 2006; DE OLIVEIRA JR et al., 2023).

A influência das condições climáticas locais nos modelos de correção troposférica tem sido amplamente discutida na literatura. Estudos apontam que variáveis atmosféricas, como temperatura, umidade relativa e pressão, são determinantes no comportamento do atraso troposférico e dos gradientes troposféricos. Modelos empíricos amplamente utilizados, como Saastamoinen (1972), e funções de mapeamento como a Função de Mapeamento de Niell (NMF), assumem valores médios para essas variáveis. No entanto, a variação espacial e temporal dos parâmetros atmosféricos pode afetar significativamente a precisão das estimativas de atraso troposférico, especialmente em regiões com climas extremos ou altamente variáveis (DE ABREU, ALVES e GOUVEIA, 2014; BOEHM et al., 2006; BRAGA e DAL POZ, 2022; GOUVEIA et al., 2020; NIELL, 1996; OLIVEIRA, ALVES e FERREIRA, 2014).

Regiões tropicais, como a Amazônia, frequentemente apresentam níveis elevados de umidade, contribuindo para um aumento no Atraso Zenital não Hidrostático (ZWD) e nos gradientes troposféricos. Em contrapartida, regiões mais secas, como o Sudeste e o Sul do Brasil, tendem a apresentar atrasos menores devido à redução da umidade. Essas características destacam a necessidade de abordagens adaptativas para modelar o comportamento troposférico de maneira mais precisa (CHEN e HERRING, 1997; LEANDRO, SANTOS e LANGLEY, 2006; DE OLIVEIRA JR et al., 2017; DE OLIVEIRA JR et al., 2023).

Enquanto modelos empíricos globais apresentam limitações em regiões tropicais devido à sua incapacidade de representar a variabilidade atmosférica local, estudos recentes têm explorado abordagens mais sofisticadas, incluindo a estimativa de gradientes horizontais troposféricos e o desenvolvimento de modelos baseados em Previsão Numérica de Tempo (PNT) e machine learning, buscando aprimorar a representação do atraso troposférico e, conseqüentemente, a acurácia do posicionamento GNSS (ALBUQUERQUE et al., 2024; DE LIMA et al., 2022; DE OLIVEIRA JR et al. 2023; THEODORO et al., 2022).

Neste estudo, apresentamos os resultados do PPP cinemático utilizando a estimativa do Atraso Zenital Troposférico (ZTD), com e sem a inclusão de

gradientes troposféricos, disponível no software RTKLIB, versão 2.4.2 p13, aplicado a dados de estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). As estações foram selecionadas de modo a representar diferentes regiões e condições climáticas do Brasil, permitindo uma análise abrangente do impacto da sazonalidade e das características regionais nos resultados.

Na estimativa do ZTD realizada pelo RTKLIB, o Atraso Zenital Hidrostático (ZHD) é calculado, por padrão, pelo modelo de Saastamoinen (1972), assumindo umidade relativa nula. O ZTD e os gradientes troposféricos (no caso da opção "Estimate ZTD+Grad") são estimados como parâmetros desconhecidos no ajuste. Para a projeção do atraso total em diferentes elevações, é empregada a NMF.

Considerando-se os aspectos da literatura discutidos anteriormente, essa contribuição tem por objetivo avaliar a acurácia de coordenadas estimadas, com diferentes modelagens troposféricas, observando-se parâmetros como o Erro Médio Quadrático (RMSE) em relação às coordenadas oficiais da rede SIRGAS-CON. Além disso, buscamos identificar padrões de comportamento que possam contribuir para o desenvolvimento de modelos mais robustos no futuro. O software RTKLIB foi escolhido devido à sua natureza gratuita e de código aberto, facilitando a implementação de estudos comparativos e proporcionando uma base versátil para o aprimoramento contínuo dos modelos de correção troposférica (TAKASU, 2013).

MODELAGEM TROPOSFÉRICA NO GNSS

Os sinais do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) são afetados pela troposfera, que introduz atrasos devido ao índice de refração atmosférico. Esses atrasos podem ser divididos em duas componentes principais: o ZHD e o ZWD. A modelagem do ZTD é expressa pela Equação 1.

$$ZTD = ZHD + ZWD. \quad (1)$$

Em condições normais, o ZHD, que depende principalmente da pressão atmosférica e é quase estático, compõe 80% a 90% do ZTD. O ZWD, por outro lado, está associado ao vapor d'água na troposfera e é mais difícil de modelar com precisão. Por isso, é frequentemente estimado como um parâmetro desconhecido durante o processamento GNSS. Ele representa cerca de 10% a 20% do ZTD. Em regiões tropicais ou em dias de alta umidade, essa porcentagem pode ser ligeiramente maior devido ao maior teor de vapor d'água na atmosfera (BOEHM et al., 2006; DAVIS et al., 1985; LEANDRO, SANTOS e LANGLEY, 2006). Avanços recentes sugerem a incorporação de modelos mais sofisticados para capturar a variabilidade atmosférica, como discutido por Barriot e Feng (2021).

Oliveira, Alves E Ferreira (2014) e Gouveia et al. (2020) observaram que o ZWD apresenta grande variabilidade em regiões como a Amazônia, e que modelos regionais baseados em PNT são mais eficazes na sua estimativa. Theodoro et al. (2022) concluíram que modelos globais empíricos apresentam limitações em regiões tropicais, como o Brasil, devido à incapacidade de representar adequadamente a variabilidade atmosférica local, o que se manifesta em erros verticais aumentados, especialmente durante a estação chuvosa, e resulta em acurácia decimétrica no PPP com resolução de ambiguidades.

FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DE NIELL

Para corrigir os atrasos troposféricos ao longo da linha de visada do satélite, utilizam-se funções de mapeamento, que projetam o atraso zenital em direções arbitrárias. No RTKLIB, a função padrão é a NMF. Ela é definida separadamente para o ZHD e o ZWD. A fórmula geral é dada pela Equação 2.

$$m(E) = \frac{1}{\frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}}. \quad (2)$$

onde:

- E é o ângulo de elevação do satélite, e
- a, b, c são os parâmetros ajustados empiricamente para o ZHD e o ZWD, variando conforme a localização e a estação do ano.

Os parâmetros para o ZHD são ajustados com base em tabelas globais pré-definidas que consideram latitude, altitude e época do ano (diferenciando verão e inverno). Já o ZWD apresenta alta variabilidade espaço-temporal por depender do vapor d'água atmosférico, sendo usualmente estimado durante o processamento, pois modelos empíricos não conseguem representá-lo com a mesma precisão do ZHD (LEANDRO, SANTOS e LANGLEY, 2006; NIELL, 1996; TAKASU, 2013).

No entanto, autores como Boehm et al. (2006) e Braga e Dal Poz (2022) demonstraram que a NMF apresenta limitações significativas em regiões tropicais, como o Brasil, sugerindo o uso de funções de mapeamento regionais baseadas em dados meteorológicos reais, como as Funções de Mapeamento de Viena (VMF1 e VMF3). Tais funções, baseadas em dados de PNT, superam as limitações da NMF em regiões tropicais, oferecendo correções mais precisas para ZTD e gradientes horizontais. Estudos recentes (Li et al., 2022) demonstram que a integração multi-GNSS potencializa essa abordagem, especialmente em PPP-RTK.

GRADIENTES TROPOSFÉRICOS

O RTKLIB permite estimar não apenas o ZTD, mas também os gradientes horizontais troposféricos (G_N e G_E). Esses gradientes capturam variações horizontais nos atrasos troposféricos, sendo especialmente úteis em regiões de grande heterogeneidade atmosférica. Em cenários de grande variação climática e geográfica, a modelagem adequada desses gradientes pode melhorar significativamente a precisão do PPP, ao permitir uma representação mais fiel das condições atmosféricas locais (TAKASU, 2013; YASUDA, 2009).

Estudos como os de Dousa e Vaclavovic (2014) destacam a importância da estimativa do ZTD e gradientes troposféricos para aplicações em previsão do tempo e no PPP, enquanto Chen e Herring (1997) demonstram a influência da assimetria atmosférica na precisão de dados geodésicos. Além disso, de Oliveira Jr et al. (2017) e Rocken, Van Hove e Ware (1997) ressaltam a importância de modelar as variações atmosféricas para aprimorar a precisão em cenários de grande heterogeneidade. Complementando essas abordagens, Ning e Elgered (2025) evidenciam que os gradientes horizontais troposféricos estimados a partir de dados GNSS contêm informações valiosas sobre as condições meteorológicas locais, sendo cruciais para melhorar a acurácia do ZTD derivado do GNSS.

Morel et al. (2021) investigaram a correlação entre os gradientes troposféricos horizontais e a topografia local, observando que as direções dos gradientes tendem a apontar para o relevo, explicando este comportamento por uma deformação vertical da camada troposférica na presença de montanhas. Essa correlação é mais evidente em estações próximas a cadeias de montanhas ou montanhas isoladas, e a orientação dos gradientes parece ser uma característica sistemática, não dependente de variações sazonais ou diurnas significativas.

O atraso adicional devido aos gradientes é descrito pela Equação 3 (DAVIS et al., 1993; MACMILLAN, 1995).

$$\Delta T(E, A) = fm_g \times [G_N \times \cos(A) + G_E \times \sin(A)]. \quad (3)$$

onde:

- fm_g é a função de mapeamento de gradiente arbitrária,
- A é o azimute do satélite,
- G_N é o gradiente na direção norte, e
- G_E é o gradiente na direção leste.

Esses parâmetros são tratados como desconhecidos no ajuste de parâmetros realizado pelo RTKLIB (TAKASU, 2013).

MODELOS BASEADOS EM DADOS E TECNOLOGIAS AVANÇADAS

Funções de mapeamento modernas, como a VMF3, baseadas em dados de PNT, superam as limitações da NMF em regiões tropicais, oferecendo correções mais precisas para ZTD e gradientes horizontais. Estudos como Theodoro et al. (2022) mostraram que modelos de PNT (Eta15km) e a estimativa do ZTD podem fornecer acurácia em nível centimétrico, diferentemente do Saastamoinen, que apresentou acurácia decimétrica.

Além disso, a modelagem do ZWD tem sido aprimorada com o uso de técnicas de machine learning. Albuquerque et al. (2024) desenvolveram um modelo baseado em Random Forest que alcançou um RMSE de aproximadamente 3.8 cm para o ZWD no Brasil, demonstrando o potencial de modelos baseados em dados meteorológicos de superfície para estimativas precisas. De Lima et al. (2022) também reforçam a superioridade de modelos baseados em PNT em comparação com empíricos no domínio do atraso e da altura, com diferenças de acurácia de até 16 cm na componente de altura. Essas abordagens são cruciais para o desenvolvimento de técnicas como o PPP-RTK, onde a mitigação dos efeitos atmosféricos é um desafio central para a rápida convergência e alta acurácia.

Nesse contexto, De Oliveira Jr. et al. (2023) propuseram uma alternativa para derivar correções SSR (State Space Representation) troposféricas (e também ionosféricas) para PPP-RTK, utilizando restrições adaptativas. Tal estudo abordou a modelagem do ZWD e de outros parâmetros atmosféricos, buscando aprimorar a representação da variabilidade atmosférica.

METODOLOGIA

DADOS E ESTAÇÕES RBMC

Os dados utilizados neste estudo foram coletados a partir de 10 estações da RBMC, abrangendo o período de 24 horas nos dias 1 a 31 de janeiro e julho de 2020. Esses meses foram escolhidos para representar as estações de verão e inverno no hemisfério sul, respectivamente, permitindo a análise dos efeitos sazonais no atraso troposférico e na precisão do PPP. As estações selecionadas estão distribuídas em diferentes regiões do Brasil, cobrindo uma variedade de condições climáticas, desde áreas tropicais úmidas até regiões mais secas e temperadas. A localização das estações é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Localização das Estações RBMC Selecionadas



Fonte: Autoria própria (2025).

O processamento dos dados foi realizado utilizando o software RTKLIB, versão 2.4.2 p13, com configurações específicas para o PPP cinemático. As principais configurações adotadas estão detalhadas na Tabela 1. O método de posicionamento escolhido foi o PPP cinemático, com o uso de frequências portadoras L1 e L2 para eliminar o efeito ionosférico de primeira ordem. O filtro combinado foi aplicado para suavizar os dados, e uma máscara de elevação de 7° foi utilizada para evitar erros associados a sinais de satélites com baixa elevação. Além disso, foram aplicadas correções para Efeitos de Carga Oceânica Sólida (OTL) e Vieses de Código Diferencial (DCBs). As efemérides precisas finais do Serviço Internacional GNSS (IGS) e Serviço Internacional GLONASS (IGL) foram utilizadas para garantir a precisão orbital e de relógio.

Para a correção troposférica, dois cenários foram comparados: (1) estimativa apenas do ZTD e (2) estimativa do ZTD combinada com gradientes troposféricos. A NMF foi utilizada para projetar os atrasos zenitais em direções arbitrárias. A resolução de ambiguidades foi mantida no modo "float", uma vez que o PPP tradicional não resolve ambiguidades de fase de forma fixa.

As principais configurações adotadas para o processamento estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Configurações de Processamento

Item	Modelo
Método de Posicionamento	PPP Cinemático
Observáveis	L1+L2
Filtro de Kalman estendido	Combinado
Máscara de Elevação	7°
Correção de Carga Oceânica	Solid Earth Tides/Ocean Tide Loading
Mitigação dos Efeitos Ionosféricos	<i>Ion-free</i>
Efemérides	Efemérides Finais (IGS e IGL)
Constelações	GPS+GLONASS
Tipo de Solução das Ambiguidades	Float
Differential Code Biases (DCB)	P1C1
Correção Troposférica	Estimativa do ZTD versus Estimativa do ZTD+GRAD
Função de Mapeamento	NMF

Fonte: Autoria própria (2025).

As coordenadas de referência utilizadas para o cálculo do RMSE foram obtidas a partir das soluções semanais da rede SIRGAS-CON, compatíveis com o referencial IGS14, garantindo a compatibilidade temporal com os dados GNSS processados. Para permitir a análise dos erros nas componentes norte (N), leste (E) e vertical (U), essas coordenadas foram convertidas do sistema geocêntrico ITRF para o Sistema Geodésico Local (SGL) por meio da projeção em um plano topográfico local. Essa abordagem possibilitou uma avaliação detalhada do impacto da estimativa de gradientes troposféricos na precisão do PPP, bem como a identificação de padrões de comportamento associados às variações climáticas e sazonais, com ênfase nas diferenças entre os períodos de verão e inverno.

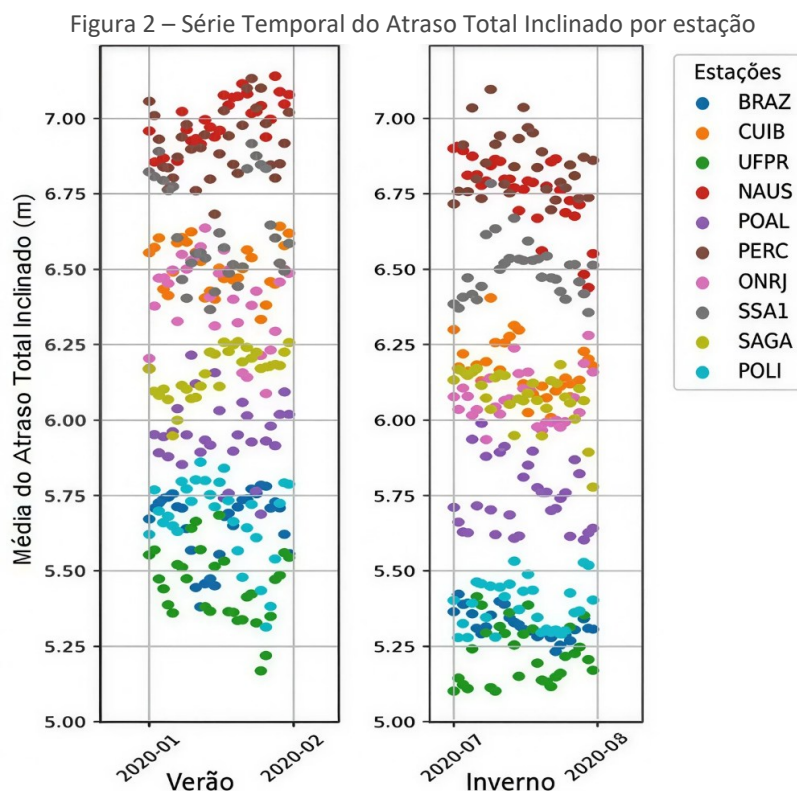
Além do cálculo do RMSE, foram realizadas análises estatísticas complementares com o objetivo de aprofundar a avaliação da acurácia posicional. A análise de correlação visou identificar relações entre variáveis atmosféricas, como ZTD, ZHD, ZWD e os gradientes troposféricos. Para isso, foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson, adequado para avaliar a intensidade e a direção de associações lineares entre variáveis contínuas. Essa abordagem permitiu verificar a influência de parâmetros atmosféricos sobre os erros de posicionamento observados.

Como complemento, foram utilizados boxplots como ferramenta gráfica para representar a dispersão, a variabilidade e a assimetria dos erros posicionais, bem como para destacar a presença de outliers. As análises estatísticas foram conduzidas com o auxílio da plataforma Google Colab, utilizando scripts em Python e as bibliotecas pandas, matplotlib e seaborn. O conjunto de dados analisado

corresponde a 1240 processamentos realizados (10 estações RBMC × 2 meses × 31 dias por mês × 2 cenários de correção troposférica).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos parâmetros troposféricos foram analisados para verificar a eficácia dos diferentes tipos de tratamento para os efeitos da troposfera disponíveis na biblioteca RTKLIB. A Figura 2 apresenta as séries temporais do atraso troposférico nos meses de verão e inverno.



Fonte: Autoria própria (2025).

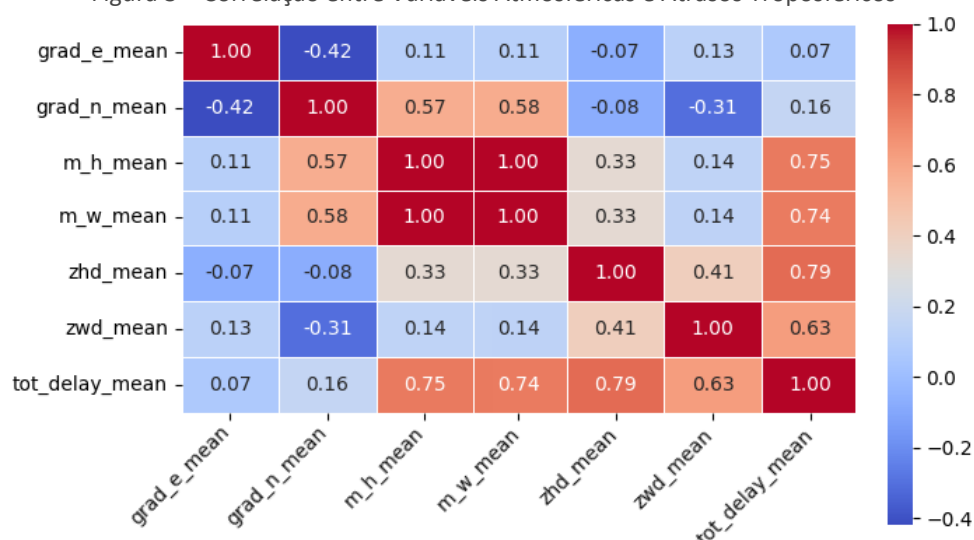
Observa-se que as estações localizadas em regiões mais quentes e úmidas, como Manaus (NAUS) e Recife (PERC), apresentaram atrasos mais elevados em janeiro devido ao aumento da umidade e calor típicos do verão nessas áreas tropicais. Em contrapartida, as estações do Sul, Sudeste e Centro-Oeste, como Porto Alegre (POAL), São Paulo (POLI), Curitiba (UFPR) e Brasília (BRAZ), mostraram atrasos menores em julho, quando o clima mais seco e frio reduz a umidade e, consequentemente, os atrasos troposféricos. Já em Salvador (SSA1), a diferença entre os meses foi mais equilibrada, devido à relativa estabilidade climática ao longo do ano.

A estação São Gabriel da Cachoeira (SAGA), localizada na região amazônica, também seguiu padrões semelhantes aos de outras estações equatoriais, com atrasos mais elevados em janeiro devido ao calor e à alta umidade do período. Embora a diferença entre janeiro e julho não tenha sido tão extrema quanto em outras estações, o impacto da umidade elevada e das condições climáticas típicas da região amazônica contribuiu para uma variação considerável nos atrasos

troposféricos. Isso demonstra a forte influência do clima local na refratividade troposférica e como ele varia ao longo do ano, corroborando com as conclusões de De Abreu, Alves e Gouveia (2014).

Na Figura 3, as correlações entre as variáveis para as 10 estações RBMC no período de janeiro e julho destacam o comportamento das relações entre os gradientes troposféricos e os atrasos zenitais, especialmente quando combinados com as funções de mapeamento hidrostática (m_h) e não hidrostática (m_w). Os gradientes troposféricos no sentido leste (grad_e) e norte (grad_n), embora com correlação mais fraca com o atraso total, ainda desempenham um papel importante na definição do comportamento atmosférico. A relação positiva e forte entre as funções de mapeamento e os atrasos totais médios (tot_delay_mean) indica que a precisão das funções de mapeamento pode ser crucial para a estimativa dos atrasos troposféricos, especialmente nas regiões em que as variações climáticas podem ser mais intensas.

Figura 3 – Correlação entre Variáveis Atmosféricas e Atrasos Troposféricos



Fonte: Autoria própria (2025).

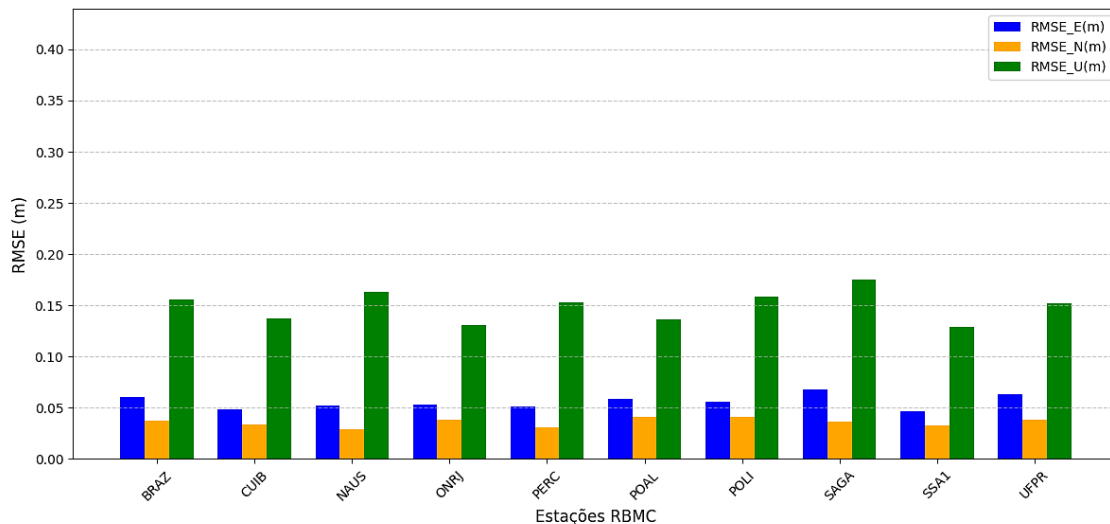
Os valores de correlação entre as variáveis revelam a complexa interação entre os gradientes troposféricos, as funções de mapeamento e os atrasos zenitais, que afetam diretamente o atraso total. Em particular, observou-se que os gradientes troposféricos apresentam correlações moderadas, mas negativas entre si, sugerindo que, em alguns cenários, um aumento em uma direção pode estar associado a uma diminuição na outra. As funções de mapeamento hidrostática e não hidrostática têm correlação perfeita, indicando que ambas respondem de maneira similar às variações atmosféricas. Além disso, o ZHD e o ZWD estão positivamente correlacionados com o atraso total, sendo os maiores responsáveis pela variação desse atraso, especialmente no caso do ZHD, que apresenta a correlação mais forte (0,79). As funções de mapeamento também desempenham um papel significativo, apresentando uma correlação de 0,75 com o atraso total.

Após o processamento dos dados, as coordenadas estimadas para cada estação RBMC foram comparadas com as coordenadas de referência fornecidas pela rede SIRGAS-CON, utilizando o RMSE para avaliar a acurácia das estimativas. Os resultados do RMSE foram analisados por meio de histogramas e Boxplots,

proporcionando uma visão detalhada da distribuição e variabilidade dos erros para cada estação.

A Figura 4 apresenta a análise dos valores de RMSE para as diferentes estações RBMC, considerando a estimativa do ZTD sem a inclusão de gradientes troposféricos no verão.

Figura 4 – RMSE das coordenadas GNSS no cenário com estimativa do ZTD – Verão



Fonte: Autoria própria (2025).

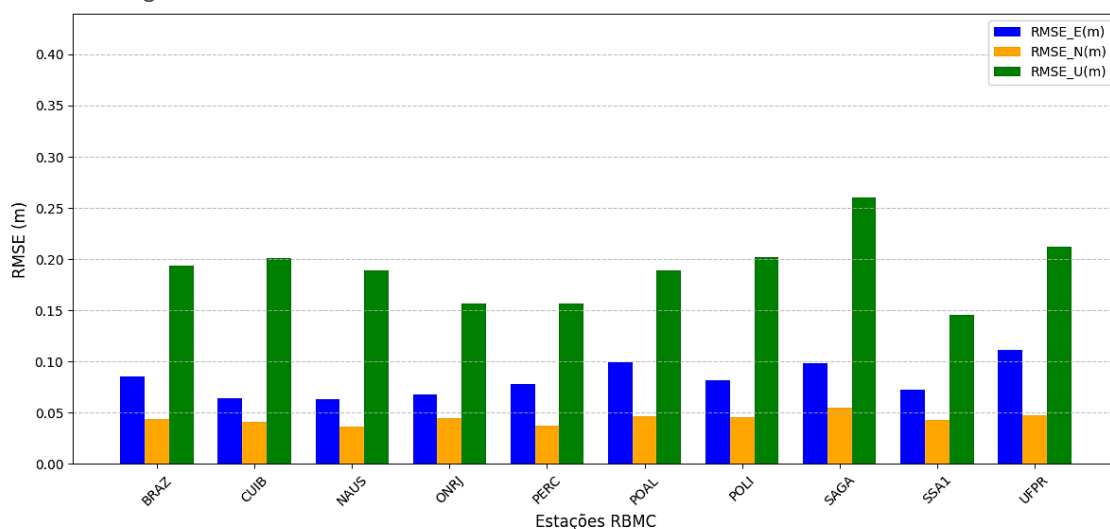
Na Figura 4, no verão, a componente U apresentou os menores valores de RMSE nas estações SSA1 (0,129 m) e ONRJ (0,131 m), ambas litorâneas, onde a influência marítima contribui para uma atmosfera mais estável e menos heterogênea. Em contrapartida, as maiores magnitudes foram observadas em SAGA (0,175 m) e NAUS (0,163 m), situadas na região amazônica, caracterizada por forte convecção e elevada variabilidade de umidade, fatores que aumentam a complexidade do atraso troposférico. Estações localizadas em regiões de relevo mais elevado, como BRAZ (0,156 m), UFPR (0,152 m) e POLI (0,159 m), apresentaram valores intermediários, evidenciando que a topografia também afeta a homogeneidade atmosférica e, consequentemente, a acurácia. As componentes horizontais (E e N) permaneceram baixas, com E variando de 0,047 m (SSA1) a 0,068 m (SAGA) e N de 0,029 m (NAUS) a 0,041 m (POAL e POLI), mostrando que os erros nas componentes horizontais foram menos sensíveis do que os erros na componente U no verão.

Na Figura 5 são apresentados os resultados de RMSE para o cenário com a estimativa do ZTD, sem a inclusão de gradientes troposféricos, no período do inverno.

Durante o mês de julho, no inverno (Figura 5), os resultados indicam uma degradação geral da acurácia em comparação a janeiro. A estação SAGA apresentou os maiores valores de RMSE, chegando a 0,26 m na componente U, o que reflete a dificuldade da modelagem troposférica em uma região equatorial úmida e com forte convecção atmosférica mesmo no período de inverno. De forma semelhante, UFPR e POAL, ambas em regiões de relevo mais acidentado e sujeitas a frentes frias e variabilidade atmosférica marcante no inverno, também apresentaram resultados piores, com RMSE na componente U próximos de 0,20

m. Em contraste, SSA1 e ONRJ mantiveram-se entre as estações mais estáveis, embora com degradação em relação ao verão, apresentando valores de RMSE entre 0,14 a 0,16 m na componente U. Nota-se ainda que as estações de interior como BRAZ e CUIB, embora com valores intermediários, sofreram degradação significativa entre janeiro e julho, refletindo as diferenças sazonais da troposfera brasileira.

Figura 5 – RMSE das coordenadas GNSS no cenário com estimativa do ZTD – Inverno



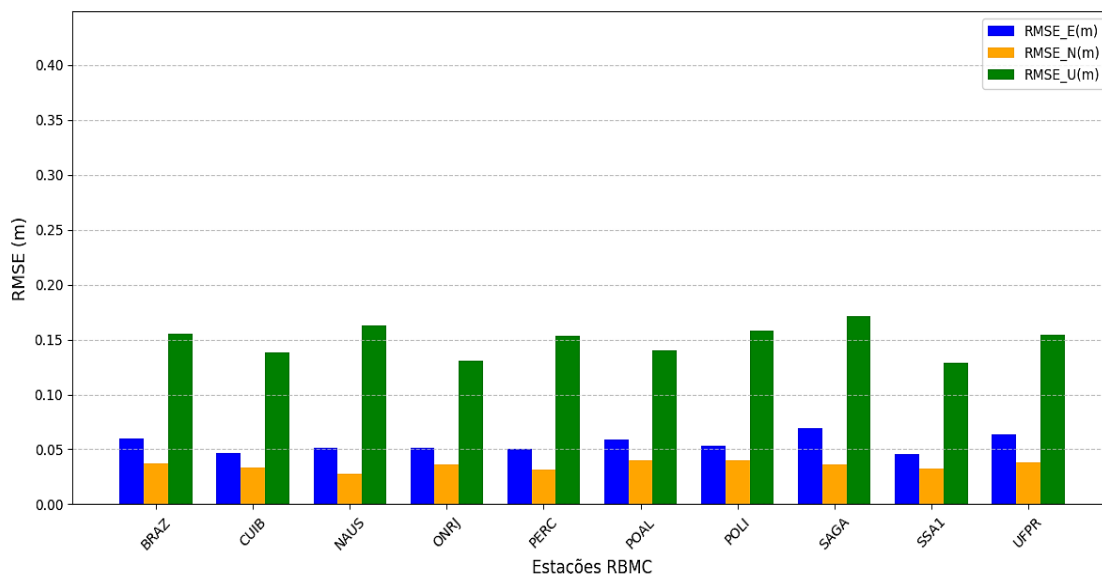
Fonte: Autoria própria (2025).

De modo geral, os resultados evidenciam que o cenário de janeiro apresentou melhor acurácia em praticamente todas as estações, especialmente na componente U, quando comparado ao inverno de julho. Essa tendência pode ser explicada pelo fato de que, durante o verão, a maior variabilidade do vapor d'água atmosférico fornece um sinal mais pronunciado para o Filtro de Kalman estendido, permitindo um ajuste mais refinado do ZTD no PPP cinemático. No inverno, apesar da atmosfera ser menos úmida, as heterogeneidades locais, associadas à atuação de frentes frias, inversões térmicas e maior estabilidade atmosférica, acabam dificultando a estimativa precisa dos parâmetros troposféricos.

Além disso, o processamento com 24 horas de rastreamento possibilita que o filtro do RTKLIB refine continuamente os parâmetros ao longo do dia. No verão, esse longo período de rastreamento favorece a convergência do modelo, já que as variações do ZWD são mais intensas e ajudam a ajustar o ZTD às condições atmosféricas locais. Já no inverno, em que a variabilidade do vapor d'água é menor, o mesmo intervalo de rastreamento prolongado não fornece informação atmosférica suficiente para compensar as heterogeneidades regionais, resultando em maior degradação dos resultados. Assim, a modelagem baseada apenas na estimativa do ZTD mostrou-se mais eficiente no verão, enquanto no inverno apresentou limitações mais evidentes, sobretudo em estações situadas em regiões de relevo acentuado (UFPR, POAL) ou sob forte variabilidade climática (SAGA).

Na Figura 6 são apresentados os resultados de RMSE para o cenário com a estimativa do ZTD e a inclusão de gradientes troposféricos, no período do verão.

Figura 6 – RMSE das coordenadas GNSS no cenário com estimativa do ZTD e gradientes troposféricos – Verão



Fonte: Autoria própria (2025).

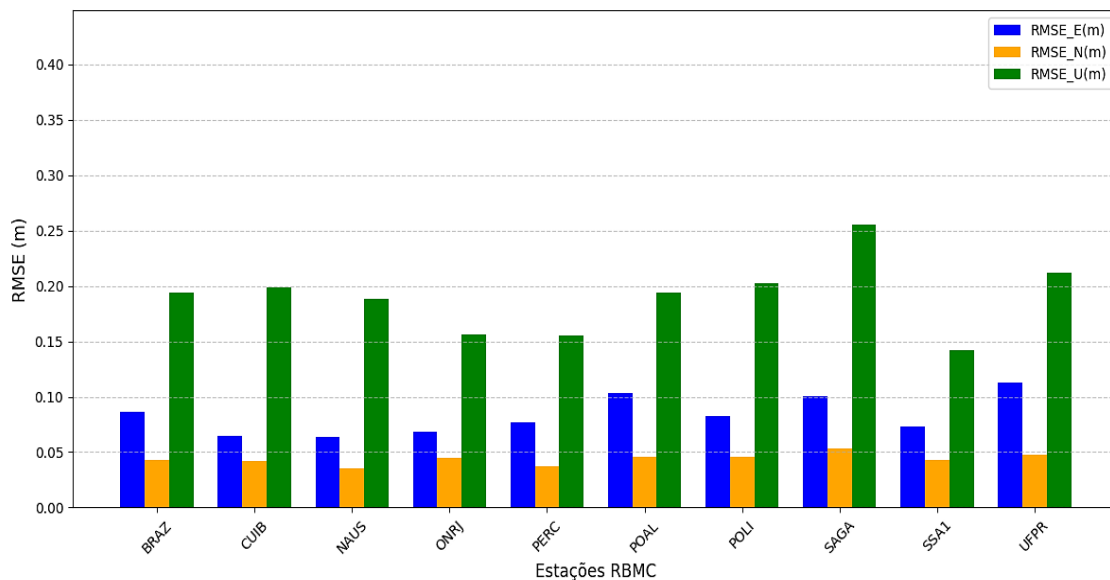
Na Figura 6, correspondente ao verão com a inclusão de gradientes troposféricos, nota-se que as estações SSA1 (0,129 m) e ONRJ (0,131 m), ambas em regiões litorâneas, continuam apresentando as melhores acurácias na componente U. A influência marítima e a menor heterogeneidade atmosférica dessas áreas explicam a estabilidade nos resultados, inclusive após a inclusão de gradientes. Entre as piores estações aparecem SAGA (0,171 m) e NAUS (0,163 m), ambas localizadas na Amazônia, onde a alta umidade e a forte convecção atmosférica geram maior variabilidade do atraso troposférico. No caso de SAGA, observa-se uma modesta melhora na componente U em relação ao cenário sem gradientes (0,175 m). Estações em áreas de relevo mais elevado, como BRAZ (0,156 m), POLI (0,159 m) e UFPR (0,154 m), mantiveram resultados intermediários, reforçando o papel da topografia na degradação da homogeneidade atmosférica. Assim como no cenário anterior, as componentes horizontais apresentaram erros reduzidos e estáveis, variando entre 0,028 m (componente N em NAUS) e 0,069 m (componente E em SAGA), demonstrando que a maior contribuição dos gradientes está relacionada à redução de assimetrias horizontais, embora a componente U continue a ser a mais impactada.

Na Figura 7 são apresentados os resultados de RMSE para o cenário com a estimativa do ZTD e a inclusão de gradientes troposféricos, no período do inverno.

No inverno, com a inclusão dos gradientes, a estação SAGA manteve-se como a mais crítica, alcançando 0,255 m na componente U, valor muito acima da média das demais estações, reflexo da dificuldade em modelar atmosferas equatoriais. De modo semelhante, UFPR (0,212 m) e POLI (0,203 m), em regiões de relevo mais acentuado, apresentaram elevados valores de RMSE, reforçando o impacto da topografia na estimativa dos parâmetros. Em contrapartida, SSA1 (0,142 m) e ONRJ (0,156 m) mantiveram os melhores desempenhos, ainda que com degradação em relação ao verão. As estações de interior, como BRAZ (0,194 m) e CUIB (0,199 m), apresentaram valores intermediários, mas também sofreram degradação sazonal. As componentes horizontais permaneceram em níveis baixos, geralmente abaixo

de 0,10 m, evidenciando que, embora os gradientes melhorem a modelagem das assimetrias horizontais, a componente U continua sendo a mais afetada.

Figura 7 – RMSE das coordenadas GNSS no cenário com estimativa do ZTD e gradientes troposféricos – Inverno



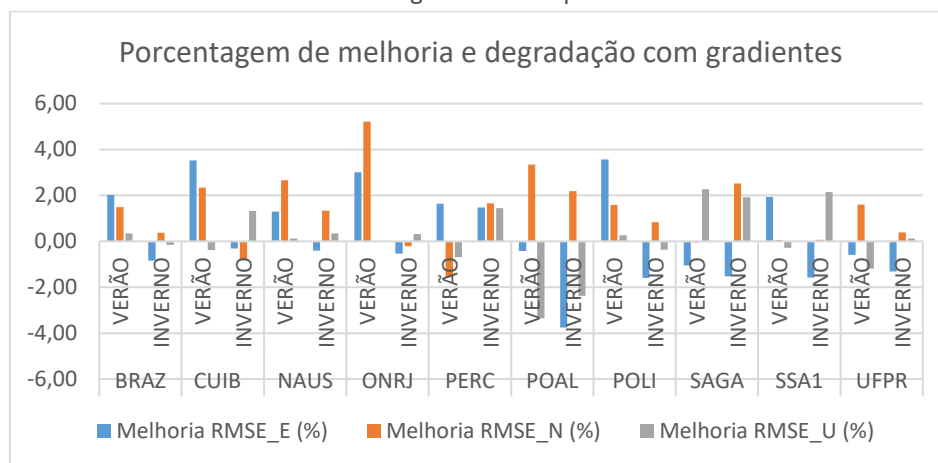
Fonte: Autoria própria (2025).

No inverno, com a inclusão dos gradientes, a estação SAGA manteve-se como a mais crítica, alcançando 0,255 m na componente U, valor muito acima da média das demais estações, reflexo da dificuldade em modelar atmosferas equatoriais. De modo semelhante, UFPR (0,212 m) e POLI (0,203 m), em regiões de relevo mais acentuado, apresentaram elevados valores de RMSE, reforçando o impacto da topografia na estimativa dos parâmetros. Em contrapartida, SSA1 (0,142 m) e ONRJ (0,156 m) mantiveram os melhores desempenhos, ainda que com degradação em relação ao verão. As estações de interior, como BRAZ (0,194 m) e CUIB (0,199 m), apresentaram valores intermediários, mas também sofreram degradação sazonal. As componentes horizontais permaneceram em níveis baixos, geralmente abaixo de 0,10 m, evidenciando que, embora os gradientes melhorem a modelagem das assimetrias horizontais, a componente U continua sendo a mais afetada.

A Figura 8 apresenta os resultados de melhorias e degradações para as componentes E, N e U, evidenciando o impacto dos gradientes nas diferentes estações RBMC.

A Figura 8 indica que, no verão, os gradientes são mais efetivos para reduzir assimetrias horizontais, com ganhos nas componentes horizontais em várias regiões. Em áreas litorâneas e de interior, como ONRJ e CUIB, observam-se melhorias nas componentes horizontais, padrão que também aparece em BRAZ e NAUS. A componente U no verão permanece, na maioria das estações, neutra ou levemente degradada em ambientes subtropicais/altos (POAL -3,34% e UFPR -1,19%), indicando que a componente U segue mais sensível à modelagem troposférica mesmo com a estimativa de gradientes. Uma exceção importante é a Amazônia: SAGA apresenta melhoria na componente U (+2,27%), coerente com a forte anisotropia induzida por convecção; em NAUS pode-se observar melhorias nas componentes E e N e melhorias mais modestas na componente U.

Figura 8 – Variações percentuais no RMSE (melhorias ou degradações) obtidas com a inclusão de gradientes troposféricos.



Fonte: Autoria própria (2025).

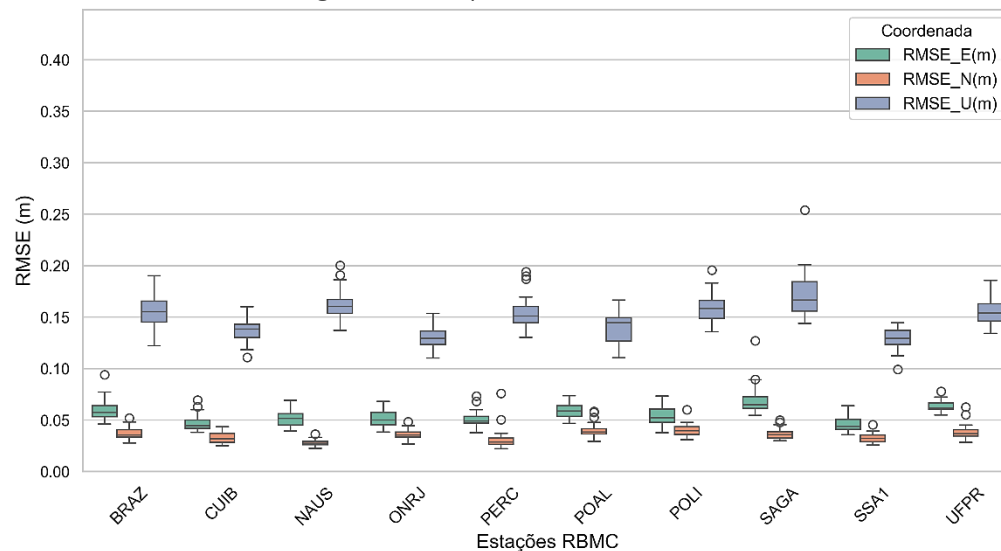
No inverno, o padrão se inverte parcialmente: a componente E tende a degradar em muitas estações (como POAL -3,75% e POLI -1,59%), enquanto N mantém ganhos modestos (SAGA +2,52%, PERC +1,65%). Já a componente U melhora sobretudo em ambientes equatoriais e litorâneos: SAGA (+1,92%), NAUS (+0,34%), SSA1 (+2,15%) e PERC (+1,45%), além de um ganho menor em ONRJ (+0,31%), e piora em regiões subtropicais/altas e de relevo acentuado (POAL -2,37%, POLI -0,36%, BRAZ -0,16%). No inverno, a menor variabilidade do vapor d'água reduz a informação disponível ao longo das 24 horas para estimar gradientes com estabilidade. Por outro lado, a presença marítima ou convecção residual em regiões costeiras/equatoriais ainda fornece assimetrias suficientes para beneficiar a componente U.

Os resultados sugerem priorizar gradientes no verão quando o objetivo principal for refinar E e N (litoral e interior tropicais) e, no inverno, quando o foco for U em regiões amazônicas e litorâneas. Em áreas subtropicais/altas (POAL, POLI, UFPR, BRAZ), sobretudo no inverno, a inclusão de gradientes exige cautela por potencial degradação da componente U. Ressalta-se que as variações percentuais são pequenas, na ordem de milímetros sobre os RMSE absolutos. Portanto, a decisão de usar gradientes deve considerar a componente do experimento e a climatologia local em cada época do ano.

Na Figura 9 são apresentados os Boxplots para o cenário considerando a estimativa do ZTD com a inclusão de gradientes troposféricos, no verão. Nas figuras de Boxplot, a linha horizontal no interior de cada caixa representa a mediana dos valores, enquanto os círculos indicam outliers, ou seja, observações discrepantes em relação ao conjunto de dados.

Na Figura 9, a componente U é a que apresenta os maiores valores de RMSE em todas as estações, como esperado, já que os efeitos troposféricos impactam mais fortemente essa direção. Mesmo assim, em estações litorâneas e de baixa altitude, como ONRJ (35 m), SSA1 (-2 m) e PERC (12 m), a mediana da componente U se mantém relativamente baixa (em torno de 0,13–0,15 m), e as caixas são curtas, indicando resultados mais acurados. Nessas mesmas estações, as componentes E e N ficam próximas de 0,04–0,05 m, mostrando estabilidade também no plano horizontal.

Figura 9 – Boxplots dos RMSE das coordenadas GNSS no cenário com estimativa do ZTD e gradientes troposféricos – Verão

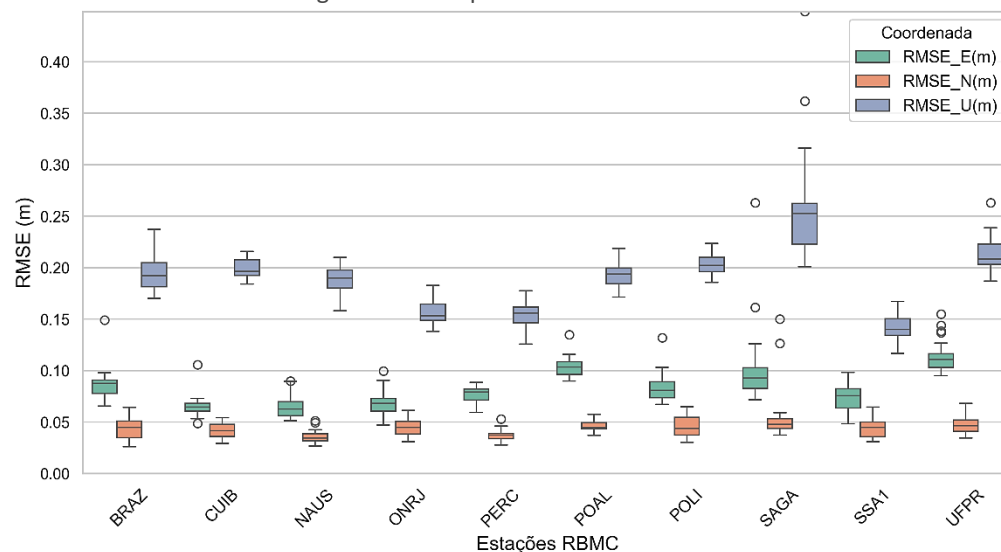


Fonte: Autoria própria (2025).

Por outro lado, em regiões de relevo acentuado ou de maior variabilidade atmosférica, a componente U apresenta maior dispersão. É o caso de UFPR (925 m) e POLI (731 m), que apresentam caixas mais altas e alguns outliers em POLI, elevando o RMSE da componente U. Já na Amazônia, a estação SAGA (95 m) apresenta uma das maiores medianas e caudas longas na componente U, reflexo da intensa variabilidade de umidade e convecção atmosférica na região.

Na Figura 10 são apresentados os Boxplots para o cenário considerando a estimativa do ZTD com a inclusão de gradientes troposféricos, no inverno.

Figura 10 – Boxplots dos RMSE das coordenadas GNSS no cenário com estimativa do ZTD e gradientes troposféricos – Inverno



Fonte: Autoria própria (2025).

No inverno, observa-se um aumento nos valores da componente U em praticamente todas as estações, com medianas variando em torno de 0,18–0,23 m

e presença de caixas mais altas e caudas alongadas. Isso indica não apenas maiores erros na componente U, mas também maior variabilidade entre os dias. As estações SAGA, UFPR e POLI apresentam os desempenhos menos acurados, com caixas mais altas e outliers na componente U, reforçando a dificuldade de modelagem. A estação SAGA exibe as medianas mais elevadas e a maior dispersão na componente U em relação às demais estações.

Em contrapartida, as estações litorâneas e de baixa altitude, como ONRJ, SSA1 e PERC, continuam apresentando os resultados mais acurados, com medianas mais baixas e caixas mais curtas em todas as componentes. Mesmo na componente U, onde os erros são maiores, os valores permanecem mais controlados nessas estações, evidenciando a influência positiva da localização costeira e das condições climáticas mais estáveis.

CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o impacto da modelagem troposférica no desempenho do PPP cinemático, utilizando dados de 10 estações da RBMC durante os meses de janeiro e julho de 2020. A análise comparou dois cenários de correção troposférica no software RTKLIB: a estimativa exclusiva do ZTD e a estimativa combinada do ZTD com gradientes troposféricos. Os resultados foram avaliados por meio do RMSE em relação às coordenadas de referência da rede SIRGAS-CON, considerando as componentes E, N e U, além de análises estatísticas como correlações e boxplots.

Os resultados demonstram que o desempenho do PPP é diretamente influenciado pelas condições climáticas e sazonais. No geral, o verão apresentou uma acurácia superior ao inverno em quase todas as estações, especialmente na componente U. Isso se deve ao fato de que, no verão, a maior variabilidade do vapor d'água fornece um sinal mais pronunciado para o filtro. O tempo de rastreamento de 24 horas possibilitou que o filtro do RTKLIB refinasse continuamente os parâmetros ao longo do dia, favorecendo a convergência do modelo. Já no inverno, a menor quantidade de vapor d'água e a maior heterogeneidade local, como frentes frias e inversões térmicas, dificultam a modelagem precisa, resultando em erros mais significativos. Nesse período, o intervalo de rastreamento prolongado não forneceu informação atmosférica suficiente para compensar as heterogeneidades regionais, o que resultou em uma maior degradação dos resultados.

A inclusão dos gradientes troposféricos teve um impacto notável, embora com resultados variados dependendo da estação e da época do ano. No verão, a estimativa dos gradientes foi mais eficaz para refinar a acurácia das componentes horizontais (E e N) em diversas estações, especialmente em regiões litorâneas e de interior tropical. Já a componente U apresentou melhorias modestas ou, em alguns casos, até uma leve degradação, exceto na estação SAGA, que mostrou um ganho na componente U considerável.

No inverno, a situação se inverteu parcialmente. As melhorias mais expressivas com a estimativa de gradientes foram observadas na componente U em regiões equatoriais e litorâneas, como SAGA, NAUS, SSA1 e PERC. Por outro lado, a componente horizontal E tendeu a degradar em diversas estações. A menor variabilidade do vapor d'água no inverno torna a estimativa de gradientes menos estável, mas a presença de fatores como a convecção residual em áreas costeiras

e equatoriais ainda fornece assimetrias atmosféricas suficientes para beneficiar a componente U. Em estações localizadas em regiões de relevo acentuado, como UFPR, POLI e POAL, a inclusão de gradientes no inverno exigiu cautela, pois, em alguns casos, resultou em degradação da acurácia na componente U. Essa sensibilidade destaca a complexa interação entre a topografia e a modelagem atmosférica.

Em síntese, os resultados sugerem que a estimativa de gradientes horizontais troposféricos pode ser uma ferramenta valiosa para aprimorar o PPP cinemático, mas sua eficácia depende do contexto geográfico e sazonal. A maior contribuição dos gradientes está relacionada à modelagem de assimetrias horizontais, embora a componente U continue a ser a mais impactada pelos erros troposféricos. Este estudo reforça a necessidade de abordagens adaptativas para a modelagem troposférica no Brasil e contribui para a compreensão de como as variações climáticas locais afetam o posicionamento GNSS, um passo importante para o desenvolvimento de modelos mais robustos no futuro.

Impact of tropospheric horizontal gradient estimation on kinematic precise point positioning in the Brazilian territory

ABSTRACT

The accuracy of Precise Point Positioning (PPP) is strongly influenced by tropospheric delay modeling, the representation of which can be enhanced by including horizontal gradients. This study compared two kinematic PPP scenarios: (1) estimating only the Zenith Tropospheric Delay (ZTD), and (2) combined estimation of ZTD and tropospheric gradients. The analysis utilized RTKLIB software and GNSS data from the Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS Systems (RBMC) across different regions of Brazil, processed for January and July 2020. The results, evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE), indicated that including gradients reduced horizontal errors by up to 9 mm at stations such as CUIB and ONRJ. However, the vertical component (U) remained the most sensitive, with values ranging from 0.13 m at SSA1 in the summer to 0.26 m at SAGA in the winter. Modest improvements in the U component were observed in equatorial regions, such as SAGA (+2.27% in summer) and SSA1 (+2.15% in winter). Conversely, subtropical and high-relief areas, such as UFPR and POAL, recorded a degradation in vertical accuracy, reaching -3.34% at POAL in the summer. Overall, summer presented higher estimation accuracy due to the more intense atmospheric variability associated with the long tracking period, which favors ZTD refinement by the Extended Kalman Filter. These results reinforce the importance of considering seasonality and local climatology when selecting tropospheric modeling strategies, as well as the potential of future approaches based on Numerical Weather Prediction and machine learning techniques to enhance PPP in the Brazilian territory.

KEYWORDS: Precise Point Positioning. Tropospheric Correction. RTKLIB.

REFERÊNCIAS

DE ABREU, P. A. G.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. Aplicação e avaliação do modelo de previsão numérica do tempo eta15km no posicionamento absoluto. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 66/3, p. 555-567, 2014.

ALBUQUERQUE, A. M.; NESPOLO, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; MARTINS-NETO, R. P.; IMAI, N. N.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T.A.F.; JEREZ, G. O. Machine learning-based modelling of zenith wet delay using terrestrial meteorological data in the Brazilian territory. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. X-3-2024, p. 13-19, 2024. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-3-2024-13-2024>.

ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; MARQUES, H. A.; SOUZA, E.; GOUVEIA, T. A. F.; Magário, J. A. Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil. **GPS Solutions**, v. 20, p. 677-685, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0477-x>.

BARRIOT, J.-P.; FENG, P. Beyond Mapping Functions and Gradients. **Geodetic Sciences: Theory, Applications and Recent Developments**, v. 2, p. 125, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96982>.

BOEHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 7, L07304, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005GL025546>.

BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. Efeitos da Refração Troposférica no Posicionamento por Ponto Preciso no Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 49, n. 2, 2022. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.118014>.

CHEN, G.; HERRING, T. A. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 102, n. B9, p. 20489-20502, 1997. <https://doi.org/10.1029/97JB01739>.

DAVIS, J. L.; ELGENED, G.; NIELL, A. E.; KUEHN, C. E. Ground-based measurement of gradients in the 'wet' radio refractivity of air. **Radio Science**, v. 28, n. 5, p. 1003-1018, 1993. <https://doi.org/10.1029/93RS01917>.

DAVIS, J. L.; HERRING, T. A.; SHAPIRO, I. I.; ROGERS, A. E. E.; ELGERED, G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. **Radio Science**, v. 20, n. 6, p. 1593-1607, 1985. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>.

DOUSA, J.; VACLAVOVIC, P. Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. **Advances in Space Research**, v. 53, n. 9, p. 1347-1358, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.021>.

GOUVEIA, T. A. F.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; GEREMIA-NIEVINSKI, F. 50 years of synergy between Space Geodesy and Meteorology: from a GNSS positioning error to precipitation nowcasting applications. **Revista brasileira de cartografia**, v. 72, n. 50, p. 1536-1561, 2020. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56767>.

KOUBA, J.; HÉROUX, P. Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products. **GPS Solutions**, v. 5, n. 2, p. 12-28, 2001.

LANDSKRON, D.; BÖHM, J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. **Journal of Geodesy**, v. 92, p. 349-360, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>.

LEANDRO, R. F.; SANTOS, M. C.; LANGLEY, R. B. UNB neutral atmosphere models: Development and performance. In: **NATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION**, 2006, Monterey, CA. *Proceedings [...]*. Monterey, CA: Institute of Navigation, 2006. p. 564-573.

LI, X.; WANG, Q.; WU, J.; YUAN, Y.; XIONG, Y.; GONG, X.; WU, Z. Multi-GNSS products and services at iGMAS Wuhan Innovation Application Center: Strategy and evaluation. **Satellite Navigation**, v. 3, p. 20, 2022. <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00081-3>.

DE LIMA, T. M. A.; SANTOS, M.; ALVES, D. B. M.; NIKOLAIDOU, T.; GOUVEIA, T. A. F. Assessing ZWD models in delay and height domains using data from stations in different climate regions. **Applied Geomatics**, v. 14, p. 93-103, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12518-021-00414-y>.

MACMILLAN, D. S. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 9, p. 1041-1044, 1995. <https://doi.org/10.1029/95GL00887>.

MOREL, L.; MOUDNI, O.; DURAND, F.; NICOLAS, J.; FOLLIN, J. M.; DURAND, S.; POTTIAUX, E.; BAELEN, J. V.; DE OLIVEIRA JR, P. S. On the relation between GPS tropospheric gradients and the local topography. **Advances in Space Research**, v. 68, n. 4, p. 1676-1689, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.008>.

NIELL, A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 101, n. B2, p. 3227-3246, 1996. <https://doi.org/10.1029/95JB03048>.

NING, T.; ELGERED, G. Atmospheric horizontal gradients measured with eight co-located GNSS stations and a microwave radiometer. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 18, n. 9, p. 2069-2082, 2025. <https://doi.org/10.5194/amt-18-2069-2025>.

OLIVEIRA, A. F.; ALVES, D. B. M.; FERREIRA, L. D. D. Avaliação de diferentes modelos troposféricos de previsão numérica do tempo no posicionamento em redes. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, p. 716–733, 2014. <https://doi.org/10.14393/rbcv66n3-44765>.

DE OLIVEIRA JR, P. S.; MOREL, L.; FUND, F.; LEGROS, R.; MONICO, J. F. G.; DURAND, S.; DURAND, F. Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK. **GPS Solutions**, v. 21, n. 1, p. 237-250, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-016-0518-0>.

DE OLIVEIRA JR, P. S.; MOREL, L.; GALERA MONICO, J. F.; DURAND, S.; DURAND, F.; BEZERRA, L. D. S. An alternative to derive ionospheric and tropospheric SSR corrections for PPP-RTK using adaptive constraints. **Survey Review**, v. 55, p. 524-535, 2023. <https://doi.org/10.1080/00396265.2023.2169063>.

ROCKEN, C.; VAN HOVE, T.; WARE, R. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 24, p. 3221-3224, 1997. <https://doi.org/10.1029/97GL03312>.

SAASTAMOINEN, J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. **Geophysical Monograph Series**, v. 15, p. 247-251, 1972. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>.

TAKASU, T. **RTKLIB: An open-source program package for GNSS positioning**. RTKLIB Documentation, 2013. Disponível em: <http://www.rtklib.com/>.

THEODORO, L. T. C.; RODRIGUES, T. L.; OLIVEIRA JUNIOR, P. S. D.; VESTENA, K. D. M. Assessment of tropospheric modeling on PPP-AR performances under brazilian atmospheric condition. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 28, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702022000300013>.

Recebido: 24 fev. 2025

Aprovado: 06 jun. 2025

DOI: 10.3895/rbgeo.v13n2.19979

Como citar: THEODORO, L. T. C.; VESTENA, K. M.; RODRIGUES, T. L.; OLIVEIRA Jr, P. S.. Impacto da Estimativa de Gradientes Horizontais Troposféricos no Posicionamento por Ponto Preciso Cinemático na Região Brasileira. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 327-348, jul./dez. 2025. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Lais Thuany Cardoso Theodoro

Rua Brigadeiro Franco, 1826, CEP 80420-200, Curitiba, Paraná, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

