

# Investigação da homogeneidade do vapor d'água precipitável na serra do mar paranaense empregando o método PPP-GNSS

## RESUMO

**Kelvin William de Souza Siqueira**  
[kelvin.siqueira12@gmail.com](mailto:kelvin.siqueira12@gmail.com)  
[orcid.org/0000-0002-1929-4091](https://orcid.org/0000-0002-1929-4091)  
Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.

**Claudia Pereira Krueger**  
[cpkrueger64@gmail.com](mailto:cpkrueger64@gmail.com)  
[orcid.org/0000-0002-4839-1317](https://orcid.org/0000-0002-4839-1317)  
Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.

**Luiz Fernando Sapucci**  
[luiz.sapucci@inpe.br](mailto:luiz.sapucci@inpe.br)  
[orcid.org/0000-0001-8420-8033](https://orcid.org/0000-0001-8420-8033)  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

**Christian Gonzalo Pilapanta**  
**Amagua**  
[christian.pilapanta@ufpr.br](mailto:christian.pilapanta@ufpr.br)  
[orcid.org/0000-0003-1155-7173](https://orcid.org/0000-0003-1155-7173)  
Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.

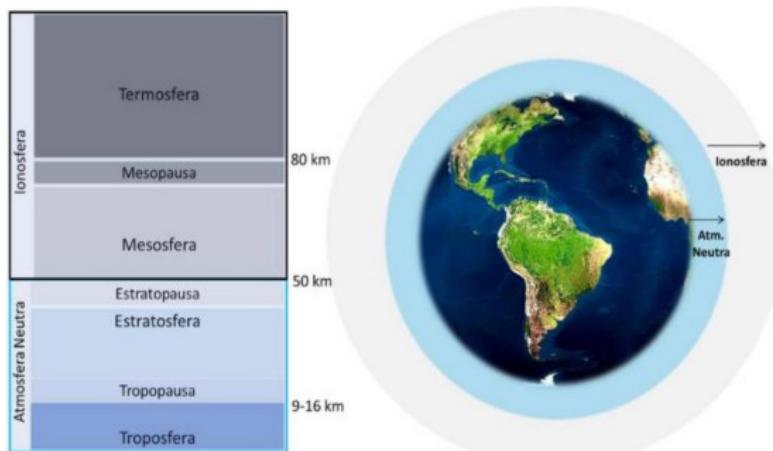
O atraso zenital troposférico é uma variável que pode ser obtida por técnicas GNSS, e indica o atraso ocasionado pela troposfera à propagação de sinais entre o satélite e o receptor. Este atraso pode ser relacionado ao vapor d'água precipitável a partir de modelagens matemáticas, permitindo uma abordagem contínua e de baixo custo para quantificação desta variável. Neste trabalho, investiga-se as séries temporais de vapor d'água de três semanas contínuas, obtidas por seis receptores GNSS localizados na Serra do Mar Paranaense. O estudo provou a correlação entre o comportamento da variável em ambas as estações, utilizando-se o coeficiente de correlação de Pearson e análise de componentes principais. Também foram aplicados testes de homogeneidade regional, que validaram a hipótese da região ser considerada homogênea em termos de vapor d'água. Foi verificada ainda resultados de interpolação geoestatística por meio da krigagem, sendo necessário a aplicação da técnica de krigagem colocalizada ponderada pela altitude, que melhorou em 83,12% o coeficiente de determinação do semivariograma teórico ajustado aos dados analisados. As séries temporais demonstraram padrões similares em quatro ocasiões em que massas de ar passaram sobre região, o que foi atestado comparando-as com cartas sinóticas de superfície do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Meteorologia; Geodésia Espacial; Troposfera; PPP; Krigagem.

## INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é uma camada de gases que envolve o planeta Terra, e age como uma estufa natural que permite a retenção de oxigênio e vapor d'água, elementos essenciais para a vida. A atmosfera é separada em diferentes camadas, sendo as camadas principais a Ionosfera, que engloba as camadas com conteúdo de elétrons livres, e a Atmosfera Neutra (ou Neutrosfera), que engloba as camadas não ionizadas (Figura 01). Na atmosfera ocorrem fenômenos onde, a partir do recebimento de radiação solar, há trocas de calor, conduzidas principalmente por correntes de convecção em sua camada mais baixa, denominada troposfera. Esta possui altitude média entre 9 km e 15 km e detém 75% de toda a massa atmosférica, concentrando 99% dos seus gases, como aerossóis, CO<sub>2</sub> e principalmente o vapor d'água (BARRY; CHORLEY, 2013), e é o ambiente de ocorrência dos principais fenômenos atmosféricos como evapotranspiração, formação de nuvens, ocorrência de chuvas e ainda eventos de maior impacto como ventos extremos, granizo e ciclones (ANDREW *et. al.*, 1987).

Figura 1 – Camadas atmosféricas terrestres



Fonte: Gouveia (2019 *apud* Teunissen; Montenbruck, 2017).

Conforme explicado por Pettersen (1956), a dinâmica de massas de ar na troposfera é um dos principais eventos atmosféricos observados no sistema Terra, que rotineiramente ocasionam a formação de frentes, quando massas de diferentes densidades e temperaturas se encontram. Estas frentes (ou sistemas frontais) são fenômenos em escala sinótica que ocorrem em regiões com características atmosféricas peculiares, tais como gradientes de temperatura elevados, umidade, vorticidade e baixa pressão, e suas atividades e efeitos influenciam diretamente o clima de uma região, alterando as variáveis de precipitação e temperatura, e contribuindo significativamente para a ocorrência de chuvas e geadas. Regiões com altas ocorrências desses fenômenos chamam-se frontogenéticas.

A detecção de frentes é geralmente realizada pela análise do comportamento temporal das variáveis de temperatura, pressão e intensidade e direção dos ventos, analisando variações bruscas de tais parâmetros por meio de algoritmos numéricos como *Single Image Edge Detector* (CAYULA; CORNILLON, 1992) e Diagramas de Hovmöller (HOVMÖLLER, 1949). Assim, técnicas de identificação de regiões homogêneas baseadas em variáveis climáticas são recursos interessantes

para entender o comportamento espaço-temporal desses eventos atmosféricos, e podem ser aplicados principalmente ao conteúdo de vapor d'água troposférico.

Como a presença de vapor na troposfera é altamente variável no espaço-tempo, sua quantificação é de difícil realização, sendo as técnicas mais eficazes o emprego de radiosondas e/ou radiômetros. Porém, o lançamento de balões meteorológicos e a instalação de radiômetros terrestres são realizações de alto custo financeiro, o que implica que a aplicação destes para monitoramento contínuo se torna impraticável sobre regiões de dimensões continentais (SAPUCCI, 2005). Radiômetros a bordo de satélites, por sua vez, são limitados devido à alta variação de temperatura superficial nas áreas continentais, não apresentando resultados com qualidade e fazendo com que seu uso seja eficiente apenas sobre áreas oceânicas.

Bevis (1992) e Kursinski (1995) foram os primeiros autores a apresentarem uma forma de contornar tal problema para o monitoramento do vapor d'água, aproveitando sinais do Sistema Global de Posicionamento americano (GPS). Em âmbito brasileiro, esta metodologia passou a ser estudada nos anos 2000, pelos trabalhos de Sapucci (2001). Desde então, esforços são realizados em parceria com diversas instituições, sob gerência do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), que continuamente expandem os estudos da troposfera e aperfeiçoam modelos numéricos a partir da assimilação de dados GNSS e de outras fontes (GOUVEIA, 2013). Outros autores que exploraram este tema em âmbito brasileiro foram Sapucci (2005), Sapucci *et. al.* (2007), Oliveira (2011), Adams *et. al.* (2011), Carvalho Filho (2016), Campos (2018) e Siqueira (2020).

As vantagens da estimativa de vapor d'água por meio de técnicas GNSS recaem na alta taxa de resolução temporal e a possibilidade de empregá-la independente das condições climáticas, não sendo afetada pela ocorrência de nuvens (LI *et al.*, 2015). Em uma abordagem multidisciplinar, este trabalho foca em estudar a homogeneidade do parâmetro vapor d'água obtido por estações GNSS.

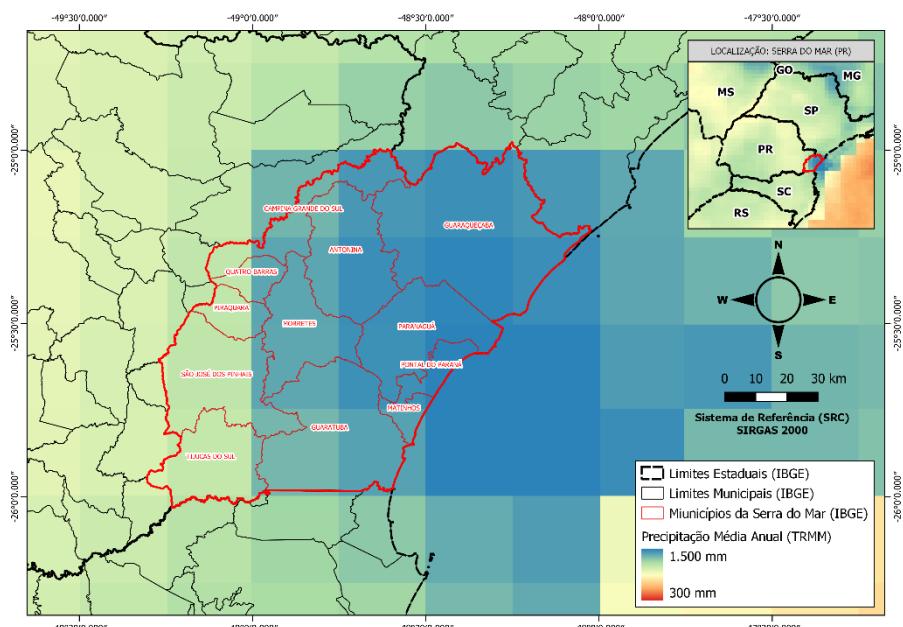
## REGIÃO DE ESTUDO

A região definida para este estudo foi a Serra do Mar Paranaense, escolhida devido a sua característica altamente frontogenética e a dificuldade de modelagem atmosférica do local. Possui relevo bastante acidentado, apresentando variação de altitude de 0 m a 1.680 m, e se localiza ao leste do estado do Paraná, abrangendo os municípios de Antonina, Guaraqueçaba, Guaratuba, Matinhos, Morretes, Paranaguá, Piraquara, Campina Grande do Sul, Quatro Barras, São José dos Pinhais e Tijucas do Sul. Diversas massas de ar atuantes no local ocasionam em significativa variação térmica e elevados volumes de chuva. Na Figura 2 é apresentado o mapa de precipitação média anual, gerado a partir de dados do sensor TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission*), onde é possível observar como a região é anômala em precipitação, em comparação com o restante do estado do Paraná.

Na região existem seis estações meteorológicas do Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR): Reserva Natural do Salto Morato (Guaraqueçaba), Paranaguá, Guaratuba, Morretes, Antonina e APPA Antonina. Também há o lançamento de radiosondas no Aeroporto Internacional Afonso

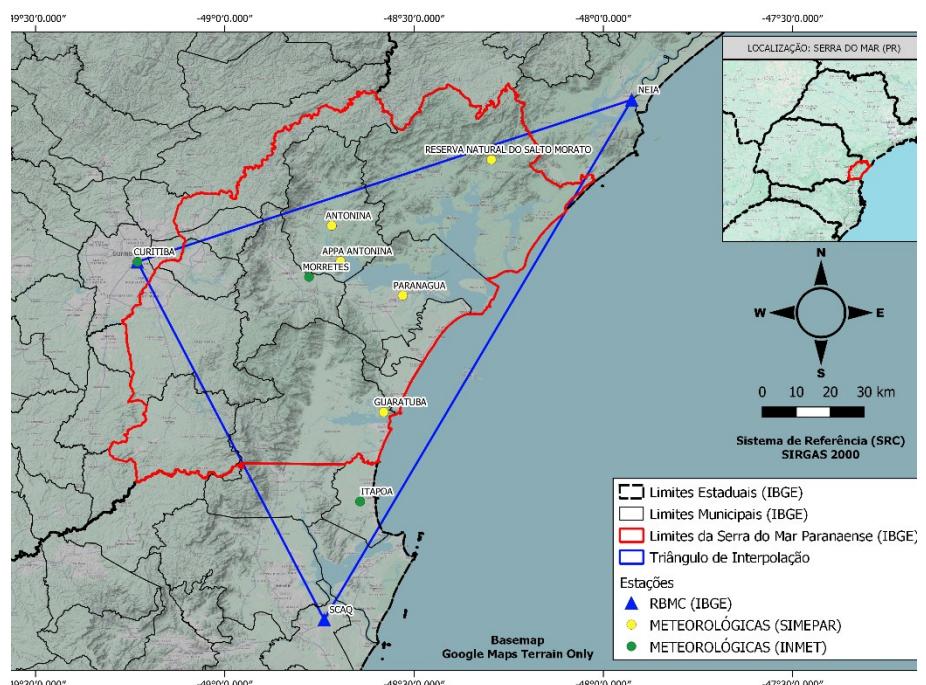
Pena, localizado em São José dos Pinhais - PR, a aproximadamente 30 km das cadeias montanhosas, realizado duas vezes ao dia. Em relação a equipamentos GNSS, não há nenhuma estação contínua na região. Porém há três estações pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), administrada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em locais próximos (Figura 3): NEIA, situada a 30 km do local (Cananéia-SP); UFPR, situada a 20 km do local (Curitiba-PR); e SCAQ, situada a 50 km do local (Araquari-SC).

Figura 2 – Precipitação média anual na Serra do Mar Paranaense



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 3 – Triângulo de estudo e estações meteorológicas da região (SIMEPAR)



Fonte: Autoria própria (2025).

## ESTRATÉGIA DE AÇÃO

### DETERMINAÇÃO DO ZTD

O funcionamento do GNSS leva em consideração a propagação de sinais de rádio na velocidade da luz, partindo da antena do satélite em órbita até a antena da estação em terra. Conforme Seeber (2003), as ondas emitidas sofrem atrasos ao cruzar a atmosfera neutra, ocasionados pelos diferentes índices de refração ao longo do trajeto, que por sua vez são proporcionais à quantidade de gases presente. Dessa forma, um atraso sobre o sinal do satélite pode ser denominado de ZTD (*Zenith Total Delay*), e pode ser separado em duas componentes: ZHD (*Zenith Hydrostatic Delay*) ocasionado pelos elementos hidrostáticos; e ZWD (*Zenith Wet Delay*), ocasionado pelos elementos úmidos da neutrosfera (MONICO, 2008). O ZTD é causado pela variação da refratividade atmosférica das camadas e se dá em função da temperatura, pressão e umidade. A altitude também é um parâmetro determinante, já que este índice está diretamente relacionado à altura da coluna vertical da atmosfera, sendo que quanto menor a altitude maior o atraso atuante. Desta maneira, segundo Lagler *et. al.* (2013), tem-se que para a determinação do ZTD é necessário um modelo troposférico, que nada mais é que um modelo empírico desenvolvido a partir de dados históricos para expressar diretamente o atraso zenital troposférico, a partir da localização, época do ano e horário. Assim, os métodos de processamento podem derivar o atraso ZTD, deixando a cargo de um ajustamento sequencial a convergência desta estimativa. Sapucci (2001) detalha melhor este processo de modelagem.

Conforme mencionado na seção anterior, a maioria dos estudos relacionados a temática PWV-GNSS em âmbito brasileiro, se utilizaram do método relativo estático. Com o intuito de explorar outras possibilidades visando agilidade e, inclusive, viabilidade de aplicação em tempo real, no presente estudo o método de processamento utilizado foi o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O PPP-IBGE faz uso do programa CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning*) desenvolvido pela Divisão de Recursos Naturais e Mensuração Geodésica do Canadá (NRCan). Este algoritmo obtém as coordenadas precisas do ponto rastreado, empregando os seguintes arquivos e modelos (NRCan, 2025):

- Arquivos de efemérides dos satélites observados computados pelo Serviço Internacional GNSS (IGS);
- Arquivos com estimativas dos parâmetros da antena empregada, como deslocamento e variações do centro de fase (PCO e PCV);
- Modelos de velocidade regionais NAD83v70VG (ROBIN *et. al.*, 2020) e VEMOS2022 (SIRGAS, 2025);
- No Brasil, modelo de ondulação geoidal hgeoHNOR2020 (IBGE, 2025);
- Modelo FES2014b, para correção de marés (LYARD *et. al.*, 2021);
- Correções ionosféricas de segunda ordem baseadas no modelo IGRF14 (ALKEN *et. al.*, 2021); e
- Modelo troposférico GPT2 (*Global Pressure and Temperature 2*) para correção dos efeitos troposféricos (LAGLER *et. al.*, 2013).

Este último é o modelo oficial convencional do IERS (*International Earth Rotation Service*), e é um harmônico esférico global de ordem e grau 9, gerado usando-se um acervo de 10 anos de dados climáticos (2001 - 2010). Além deste modelo, o PPP-IBGE emprega a Função de Mapeamento de Vienna (BÖHM; WERL; SCHUH, 2006), usada para corrigir os valores de ZTD em função do ângulo de elevação dos satélites observados. Os valores de ZTD, além de serem utilizados para correção dos cálculos das coordenadas dos pontos, também são disponibilizados pelo PPP-IBGE nos arquivos finais de processamento, para cada época de observação registrada.

## CONVERSÃO DO ZTD EM PWV

Como o ZHD é proporcional a quantidade de gases secos presentes na neutrosfera, e tais gases são estáveis, ele pode ser obtido com precisão para uma determinada latitude ( $\varphi$ ), altitude ( $h_o$ ) e pressão superficial ( $P_o$ ), por meio da Equação 1 (SAPUCCI, 2001).

$$ZHD = 2,27683157 \times 10^{-3} * \frac{P_o}{1 - 0,0026 * \cos(2\varphi) - 0,00028 * h_o} \quad (1)$$

Já a componente ZWD possui alta complexidade em ser determinada, uma vez que possui alta variação espaço-temporal (Sapucci *et. al.*, 2008), por estar intimamente ligada à distribuição do vapor d'água. Nesse aspecto, vale-se então da Equação 2, assumindo que a soma das componentes resulta no atraso total.

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2)$$

A componente úmida possui forte correlação com a quantidade de vapor d'água precipitável (PWV) presente na troposfera. Em termos matemáticos se dá conforme a Equação 3 (BEVIS *et. al.*, 1992).

$$PWV = \frac{ZWD * \Psi}{\rho_a} \quad (3)$$

Resumidamente, o PWV sobre o zênite do ponto rastreado pode ser obtido multiplicando ZWD pelo fator de relação ( $\Psi$ ) e dividindo-o pela densidade da água líquida ( $\rho_a$ ), resultando na água precipitável em mm. O fator de relação é obtido conforme a equação 4, aplicando-se a constante específica do vapor da água ( $R_W$ ), duas constantes da refratividade do ar ( $k'_2$  e  $k_3$ ) e a temperatura média da coluna vertical troposférica ( $Tm$ ). Para esta última, utilizou-se o valor determinado por Sapucci (2005) para a estação RBMC de Curitiba - PR (igual a 281,559 K). Os valores dos demais parâmetros da Equação 4, assim como da Equação 3, são apresentados na Tabela 1, já com as unidades utilizadas estudo.

$$\Psi = \frac{10^6}{R_W * [k'_2 + \frac{k_3}{Tm}]} \quad (4)$$

Tabela 1 – Parâmetros empregados na modelagem PWV

Constantes Utilizadas	Valor	Unidade de medida
$\rho_a$	1,0000	kg/m <sup>3</sup>
$R_W$	461,5181	J/kg.K
$k'_2$	22,1	K/hPa
$k_3$	373900	K <sup>2</sup> /hPa

Fonte: Adaptado de Sapucci (2000).

Assim, foram obtidas séries temporais de PWV, calculadas a partir do ZTD modelado pela aplicação PPP-IBGE. A validação do uso de tal aplicação foi atestada por Siqueira (2020), onde os dados foram comparados com séries PWV do mesmo conjunto de observações obtidas pelo software científico Bernese©.

## AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados GNSS utilizados neste estudo foram coletados pelas três estações da RBMC citadas (UFPR, NEIA e SCAQ) e por outras três estações temporárias em diferentes regiões da área de estudo, à saber:

- Estação PIR: Casa da Cultura da SANEPAR, no município de Piraquara, com coordenadas geodésicas 25° 30' 18" S, 49° 4' 40" O e 897,26 m;
- Estação ANT: Escola Municipal Prof. Gil Feres, no município de Antonina, com coordenadas geodésicas 25° 26' 9" S, 48° 42' 40" O e 14,32 m; e
- Estação CEM: Laboratório de Oceanografia Geológica, do Centro de Estudos do Mar da UFPR, no município de Pontal do Paraná, com coordenadas geodésicas 25° 34' 26" S, 48° 21' 01" W e 7,52 m.

A campanha de campo durou entre os dias 11 de novembro de 2019 e 02 de dezembro de 2019, gerando séries temporais de 22 dias contínuos. Apesar de tal período ter sido limitado pelos recursos logísticos disponíveis a época da campanha, a amostra foi considerada suficiente para a análise proposta, uma vez que englobou variações sazonais relevantes e passagem de frentes sobre a região. Os arquivos foram submetidos ao PPP-IBGE, obtendo-se o atraso zenital troposférico para cada época de observação.

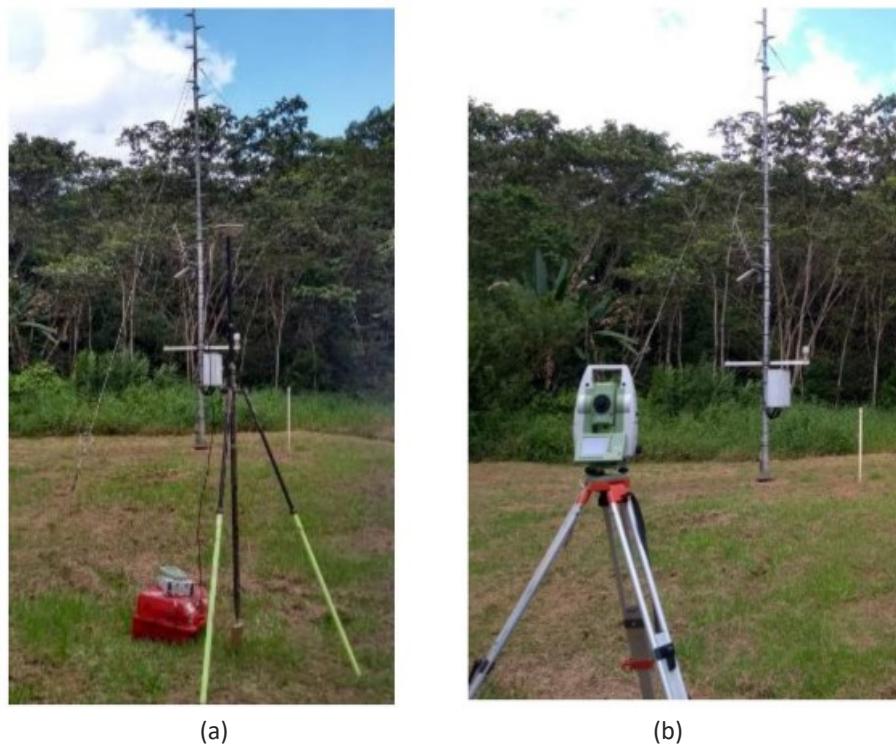
Como a pressão é inversamente proporcional a altitude (equação barométrica), para que os resultados de PWV fossem obtidos com qualidade, os valores de pressão nas estações GNSS foram calculados por meio da redução das pressões atmosféricas obtidas em barômetros próximos. Deste modo, foi selecionada uma estação atmosférica para cada estação GNSS utilizada, e o desnível entre elas foi obtido por meio de mensuração *in loco* conforme o seguinte procedimento:

1. Materialização de vértice próximo à estação meteorológica por meio de piquete de madeira;
2. Levantamento GNSS sobre o ponto materializado, para determinação de suas coordenadas geodésicas pelo método PPP (Figura 4a). O

tempo de rastreio precisou ser limitado a apenas uma hora por ponto, devido ao cronograma restrito de campo. Assim, a acurácia de posicionamento esperado para a componente altimétrica foi de 4 cm, conforme IBGE (2023), considerado adequado para o objetivo da pesquisa;

3. Transporte de altitude utilizando estação total Leica TCRA 1203+, por meio de seu medidor eletrônico de distância a laser (Figura 4b), determinando assim os vetores de posição tridimensional entre o vértice materializado e o sensor de pressão (DX, DY, DZ);
4. Processamento e obtenção das coordenadas do vértice rastreado pelo método PPP, e posterior cálculo da altitude do sensor de pressão;
5. Cálculo da pressão efetiva nas estações GNSS por meio da diferença de altitude entre estas e suas respectivas estações meteorológicas vinculadas, fazendo uso da equação hipsométrica (Equação 5). Conforme explica Holton (1992), esse é o resultado da integração da equação hidrostática entre duas altitudes, considerando a média das temperaturas desses limites como a temperatura média da camada integrada.

Figura 4 – Metodologia para obtenção de altitude dos barômetros (a) rastreio GNSS (b) nívelamento com estação total



Fonte: Autoria própria (2025).

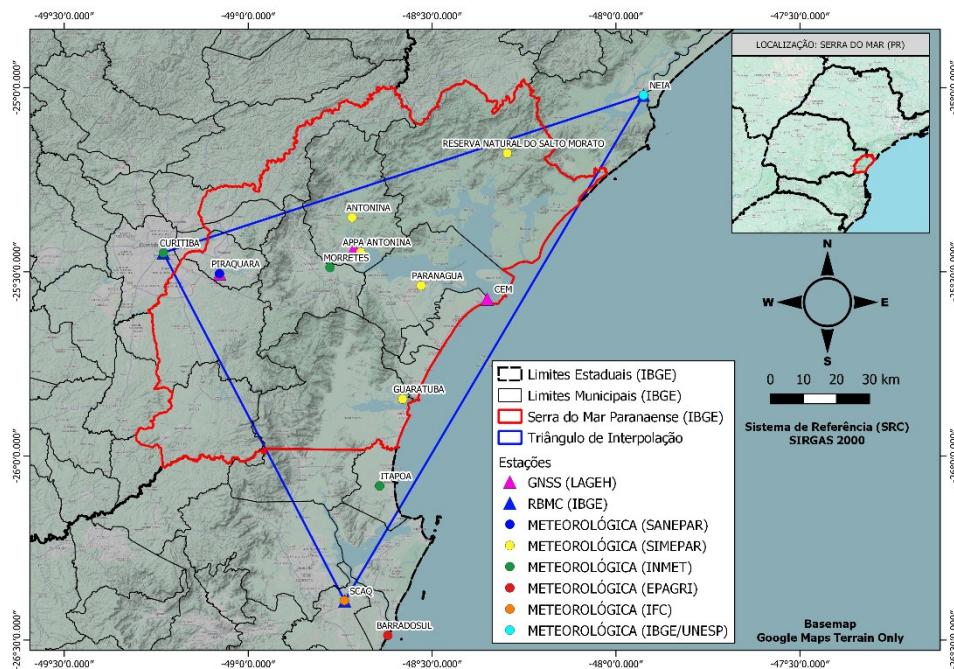
A disposição das estações GNSS e meteorológicas utilizadas neste estudo podem ser visualizadas na Figura 5. E a relação entre as estações na Tabela 2.

$$h_2 - h_1 = 29,3 * T * \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (5)$$

- $h_1$  e  $h_2$  as altitudes respectivas aos pontos 1 e 2 envolvidos na transformação, em metros;
- $T$  a temperatura média entre os pontos, em Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ );
- $P_1$  e  $P_2$  os respectivos valores de pressão dos pontos 1 e 2, em hPa;

E o valor de 29,3, dado em  $m. ^{\circ}\text{K}^{-1}$ , que representa a constante do gás para o ar seco ( $287,0538 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{K}^{-1}$ ), dividido pela aceleração da gravidade ( $9,784 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

Figura 5 – Localização das estações GNSS e atmosféricas



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 2 – Estações meteorológicas vinculadas as estações GNSS

Estação Meteorológica	Órgão Administrador	Estação GNSS Vinculada	Distância Horizontal (m)	Diferença de elevação(m)
Cananéia	IBGE/UNESP	NEIA	0,00	0,00
Piraquara	SANEPAR	PIR	29,04	-1,63
Curitiba	INMET/UFPR	UFPR	47,35	0,06
Araquari	IFC	SCAQ	139,07	-4,73
Antonina	SIMEPAR	ANT	2.092,68	-7,28
Barra do Sul	EPAGRI	SCAQ	15.628,52	-8,39
Paranaguá	SIMEPAR	CEM	18.505,27	4,08

Siqueira (2020) apresenta um estudo analisando o impacto das distâncias entre os sensores GNSS e meteorológicos, concluindo que é seguro utilizar medidores de pressão até 40 km de distância da estação GNSS, e com diferenças de elevação de até 900 metros, desde que haja a devida correção de pressão devido a diferença de altitude.

## INVESTIGAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DOS DADOS

Para entender se a região de estudo pode ser considerada homogênea em termos de vapor d'água, foram realizadas análises de exploração de dados para compreender a semelhança entre os conjuntos de dados. As séries temporais das 6 estações foram submetidas a estudos de correlação, analisadas primeiramente por meio do Coeficiente de Correlação de Pearson, de modo a verificar o quanto dependentes são entre si. Além disso, com o objetivo de verificar a maior variância possível entre as séries temporais, reduzindo a dimensionalidade dos dados, foi aplicada ainda a Análise das Componentes Principais (ACP). Esta ferramenta estatística permite identificar padrões entre  $n$  conjuntos de dados, utilizando transformações matemáticas ortogonais que exploram variâncias e estruturas (ANDERSON, 2003). Essa análise gera  $n$  novos conjuntos, denominados de Componentes Principais (CP), onde o primeiro conjunto expressa o maior grau de similaridade dos conjuntos originais, o segundo expressa a similaridade em menor grau, e assim consecutivamente, até que o último conjunto contenha apenas resíduos da transformação. Além disso, a ACP gera parâmetros denominados carregamentos, que indicam se os conjuntos de dados possuem as mesmas características em termos de variância.

Foi aplicado o Teste de Homogeneidade Regional, proposto por Hosking e Wallis (1987), onde a partir de um número  $i$  de estações, com um conjunto simultâneo de  $n$  observações, deriva-se um parâmetro denominado Medida de Heterogeneidade. Caso tal medida seja menor que 1, a região é “Aceitavelmente Homogênea”, entre 1 e 2 será “Possivelmente Heterogênea” e “Definitivamente Heterogênea” caso seja maior que 2. Tal teste foi aplicado a 5 cenários:

- Considerando todas as estações (1);
- Considerando apenas as estações localizadas no litoral (2);
- Considerando apenas as estações de maiores altitudes (3);
- Considerando todas as estações, mas somando-se o valor de 11,48 mm a todos os dados de UFPR e PIR (4). Este valor refere-se a média das diferenças entre os conjuntos dessas duas estações (de alta elevação) em comparação com as estações litorâneas. Por isso, este cenário foi pensado de modo a entender se a diferença sistemática devida a altitude pode alterar significantemente o resultado do cenário 1.

## INTERPOLAÇÃO ESPACIAL E PASSAGEM DE FRENTES

Uma interpolação espacial é ferramenta ideal para auxiliar análises que levam em consideração extensões geográficas, permitindo a estimativa de valores de um determinado fenômeno em locais onde a variável não foi de fato mensurada, contanto que hajam observações em locais próximos a ela (DRUCK et al., 2004). Quando a técnica de interpolação considera a modelagem da flutuação estatística do conjunto de dados espaciais, denomina-se krigagem, sendo uma técnica avançada que, diferentemente das demais, não se restringe a apenas atribuir pesos as distâncias e medidas, mas sim considera a variabilidade do conjunto de dados, a análise estrutural da correlação espacial entre as observações e a validação do modelo (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Como a região de estudo possui variação altimétrica de até 1.600 m, já era esperado que modelos de interpolação tradicionais como Inverso da Potência das Distâncias ou até mesmo uma Krigagem convencional não apresentassem bons resultados, uma vez que a altitude impacta diretamente no conteúdo de vapor d'água atmosférico. De fato, foi realizado estudo investigando os métodos interpoladores para PWV, apresentado em Siqueira (2020), onde concluiu-se que em tais casos, a melhor abordagem de interpolação é a Co-Krigagem Colocalizada, onde são inseridos pesos de uma determinada variável junto ao algoritmo de interpolação. Neste caso, o peso adequado foi a variável altitude, que demonstrou melhora de 149% em relação aos resultados de outras técnicas analisadas. Por isso foi empregado tal método para interpolação dos dados, utilizando-se as altitudes derivadas do Modelo Digital de Superfície (MDS) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), modelo esse obtido em uma única missão espacial no ano 2000, realizado pela Agência Espacial Americana (NASA). Ressalta-se que sendo a krigagem uma técnica de estimativa de valores de vapor d'água via interpolação, e sendo a área de estudo uma região com gradiente de altitude de até 1.800 m, não há diferença entre a aplicação de um MDS ou de um MDT (Modelo Digital de Terreno) na metodologia apresentada, motivo pelo qual não foi realizada nenhum tratamento de conversão do modelo empregado. Os dados obtidos foram comparados a cartas sinóticas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de modo a compreender se deslocamento de massas de ar deixariam impressões nas séries temporais de PWV.

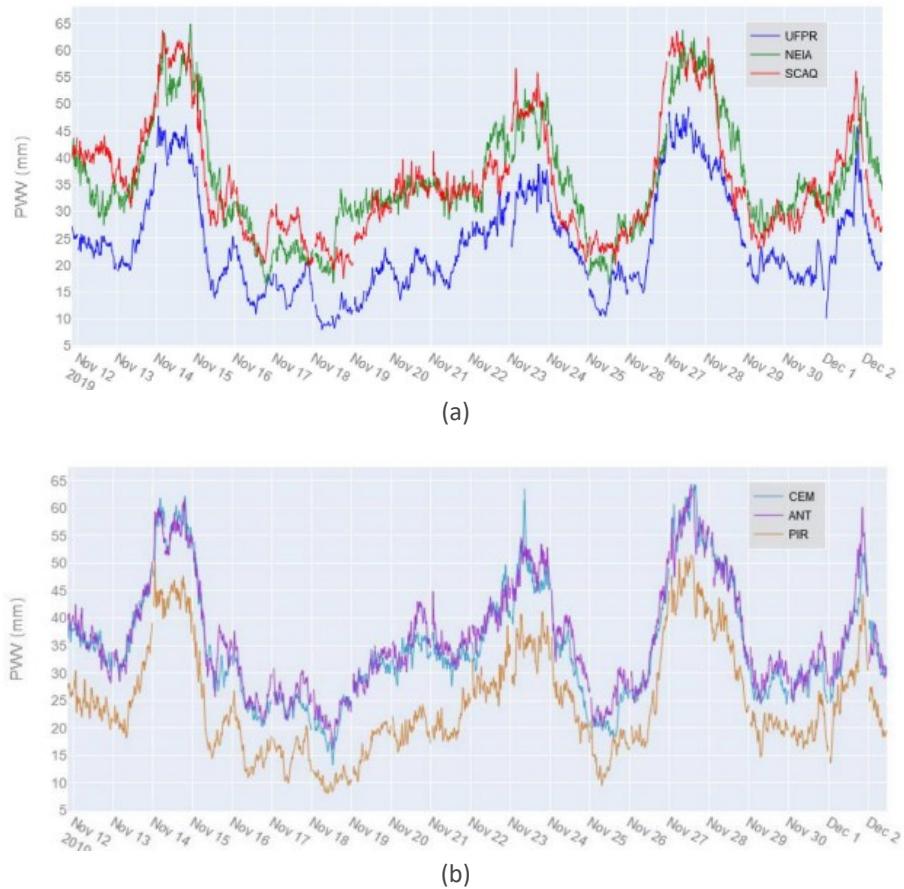
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### ANÁLISE DO CONJUNTO DE DADOS OBTIDOS

Os valores de PWV foram obtidos a partir dos valores de temperatura e pressão dos respectivos barômetros associados a cada receptor. Na Figura 6 podem ser observadas as séries temporais geradas, onde é possível perceber como a dinâmica do vapor d'água foi similar entre todas as estações.

Especificamente para as estações UFPR e PIR (denominadas de estações de alta elevação), apesar de seus conjuntos de dados possuírem o mesmo comportamento das demais estações, apresentaram deslocamento ligeiramente abaixo, possuindo, em média, 11,48 mm a menos em vapor d'água que as estações litorâneas. Tal diferença já era esperada uma vez que conforme maior a elevação, menor a espessura da camada troposférica, e consecutivamente menor o conteúdo de vapor d'água presente. A Tabela 3 contém os dados estatísticos das referidas séries temporais.

Figura 6 – Séries temporais PWV-GNSS (a) Estações RBMC (b) Estações LAGEH/UFPR



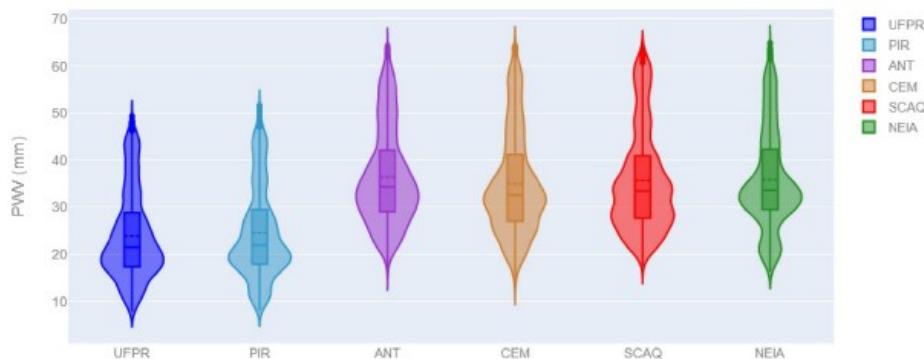
Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 3 – Descritores estatísticos das séries temporais PWV-GNSS

	UFPR	NEIA	SCAQ	PIR	ANT	CEM
<b>Número de Amostras</b>	5632	5632	5632	5632	5632	5632
<b>Média (mm)</b>	23,96	35,85	35,65	24,55	36,42	35,00
<b>Desvio Padrão (mm)</b>	9,30	10,44	10,74	9,68	10,06	10,73
<b>Mínima (mm)</b>	7,89	16,35	17,48	8,04	16,10	13,26
<b>Percentil 25% (mm)</b>	17,38	29,55	27,68	17,91	29,09	27,08
<b>Mediana (mm)</b>	21,53	33,60	33,45	21,94	34,36	32,61
<b>Percentil 75% (mm)</b>	28,90	42,33	40,88	29,54	42,16	41,18
<b>Máxima (mm)</b>	49,41	64,93	63,73	51,57	64,35	64,36

Percebe-se que as médias, mínimas, máximas e percentis das estações UFPR e PIR estão de fato ligeiramente inferiores às das demais estações, porém os desvios padrão se mantêm similares entre todas. Ou seja, apesar do afastamento sistemático existente entre as estações litorâneas e as de maior elevação, suas variações permanecem similares, indicando que as dinâmicas troposféricas possuem o mesmo efeito sobre as 6 estações. De forma a compreender melhor a distribuição de dados de cada conjunto, foram elaborados gráficos de violino, apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Localização das estações GNSS e atmosféricas



Fonte: Autoria própria (2025).

Nenhuma das estações apresentou conjunto de dados com distribuição normal. Todos os conjuntos apresentaram distribuição com alongamento tendendo ao extremo máximo do conjunto (braço do violino), e com acúmulo de dados do lado oposto (corpo do violino). Comparando ao gráfico da Figura 6, percebe-se que as séries temporais apresentam média baixa, mas com saltos esporádicos a valores máximos discrepantes do restante do conjunto, formando picos côncavos nas séries. Os violinos das estações PIR e UFPR tiveram um deslocamento vertical negativo em relação aos demais, o que já era esperado, concentrando a maior quantidade de dados entre 10 mm e 30 mm, com mínimos beirando 8 mm e máximos beirando 50 mm. Na faixa dos 20 mm é possível ver como a distribuição se torna mais destacada, indicando uma maior concentração de dados nesta região do conjunto.

As estações ANT e CEM têm a maioria de seus dados estando entre 20 mm e 40 mm. Seus mínimos são próximos a 15 mm enquanto seus máximos são próximos a 65 mm. Tais gráficos possuem dados mais distribuídos (menos concentrados) do que UFPR e PIR, mostrando que sobre estas estações o vapor d'água esteve mais instável. Possível explicação para este fenômeno é a existência da cadeia montanhosa entre o litoral e as estações UFPR e PIR, que atua como barreiras para o fluxo de vapor. Além disso, é possível também observar que os dados da estação PIR estiveram ligeiramente acima dos dados da estação UFPR em aproximadamente 1 mm, possivelmente devido a estar ao lado do reservatório Piraquara II da Sanepar, o que pode influenciar a quantidade de vapor presente.

Os gráficos de violinos para as estações NEIA e SCAQ apresentam um padrão de distribuição único e diferente dos demais. Enquanto o gráfico de violino de SCAQ apresentou aglomeração de dados mais distribuída entre 20 mm e 40 mm, o gráfico de NEIA mostra maior concentração na faixa dos 32 mm, e uma pequena aglomeração em 20 mm. Tendo como base esses resultados, os gráficos de violino indicam uma maior instabilidade de PWV nas estações SCAQ, CEM e ANT, e mais estabilidade nas estações UFPR, PIR e NEIA. Mais investigações devem ser realizadas para identificar a causa dos comportamentos percebidos, e verificar se são padrões são contínuos ou sazonais. Como as massas de ar ocorridas neste período de observação se movimentavam de sul para norte, conforme atestado por cartas sinópticas do INPE, suspeita-se que as cadeias montanhosas na região de Guararema também dificultam o fluxo de umidade para a estação SCAQ, o que pode vir a ser um motivo de sua distribuição ser distinta das demais.

## INVESTIGAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DOS DADOS

Apesar das diferenças na distribuição dos dados, as estações possuem alta correlação entre si, como pode ser verificado na Tabela 4. Os menores valores de coeficiente de correlação de Pearson encontrados foram entre as estações SCAQ x NEIA e NEIA x UFPR, com respectivamente 87,25% e 89,44%. Os demais valores permaneceram acima de 90%. Tais resultados indicam que as diferenças sistemáticas nas estações de maiores altitudes não prejudicam a correlação dos dados, e que as variações são praticamente as mesmas para todos os conjuntos.

Tabela 4 – Correlação entre as séries PWV-GNSS

	UFPR	NEIA	SCAQ	PIR	ANT	CEM
<b>UFPR</b>	100%	87,25%	90,60%	91,78%	91,47%	92,86%
<b>NEIA</b>		100%	89,44%	92,66%	90,51%	94,87%
<b>SCAQ</b>			100%	94,75%	98,51%	93,80%
<b>PIR</b>				100%	96,03%	97,07%
<b>ANT</b>					100%	94,85%
<b>CEM</b>						100%

Referente a análise das componentes principais (ACP) foram calculados os percentuais de variância explicada por cada componente (Tabela 5). A percentagem explicada pela Componente Principal 1 (CP1) foi de 94,18%, sendo sucedida por 2,40% na CP2, e 1,94% na CP3. Os carregamentos para cada estação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 – Percentuais de variância explicadas pelas CPs

Componente	Percentual Explicado
<b>CP1</b>	94,18%
<b>CP2</b>	2,40%
<b>CP3</b>	1,94%
<b>CP4</b>	0,86%
<b>CP5</b>	0,43%
<b>CP6</b>	0,20%

Tabela 6 – Carregamentos para as estações de estudo

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
<b>SCAQ</b>	10,24	2,33	-2,23	-0,42	-0,17	0,01
<b>NEIA</b>	9,95	-2,81	-0,87	-1,03	-0,32	0,01
<b>UFPR</b>	9,03	0,78	1,80	-0,77	0,24	0,72
<b>ANT</b>	9,89	-0,19	0,48	1,51	-0,98	0,16
<b>PIR</b>	9,47	0,68	1,62	-0,44	-0,04	-0,83
<b>CEM</b>	10,58	-0,70	-0,46	1,02	1,22	-0,04

A CP1 manteve os carregamentos principais de todas as estações, indicando que todos os conjuntos pertencem a uma mesma região homogênea. Na CP2 se mantiveram SCAQ e NEIA, enquanto na CP3, UFPR e PIR, e na CP4, ANT e CEM. Apesar de SCAQ e NEIA terem seus carregamentos secundários na CP2, tem-se que SCAQ apresentou ainda seu terceiro carregamento de -2,23 na CP3, muito similar, em módulo, ao seu segundo carregamento na CP2, o que significa que essas duas componentes repartem as variâncias explicadas para esta estação. Desta maneira, conclui-se que em uma subdivisão regional, SCAQ e NEIA são consideradas estações individuais, não estando dentro de subgrupos, enquanto UFPR e PIR formariam um subgrupo específico, e ANT e CEM outro subgrupo. Ao prosseguir a análise do terceiro carregamento de cada estação, observa-se que NEIA apresentou valor igual a -1,03 na CP4, indicando uma similaridade em terceiro grau com o subgrupo das estações ANT e CEM, o que possivelmente não acontece com SCAQ devido a esta se encontrar separada das demais pela cadeia montanhosa da Serra de Guaraqueçaba.

Os resultados dos 4 cenários do teste de homogeneidade são apresentados na Tabela 7, com as respectivas medidas de heterogeneidade, todas obtidas após um número de 500 simulações. A medida de heterogeneidade deve permanecer abaixo de 1 para o conjunto de dados ser considerado homogêneo, ou entre 1 e 2 para ser considerado possivelmente homogêneo. Assim, o primeiro cenário não teve sua hipótese aceita, indicando que a região não pode ser considerada homogênea em termos de vapor d'água quando analisadas todas as estações. Ao estudar as estações litorâneas e as estações de maiores altitudes, separadamente (cenários 2 e 3), percebe-se que ambos os testes permitem a aceitação da hipótese (conjuntos de dados homogêneos). Esse fato indica que a diferença sistemática das estações de maiores altitudes interfere de forma significativa na homogeneidade local. O quarto cenário também teve hipótese aceita, e provou que se não fosse tal diferença devido à altitude, todas as estações seriam consideradas homogêneas.

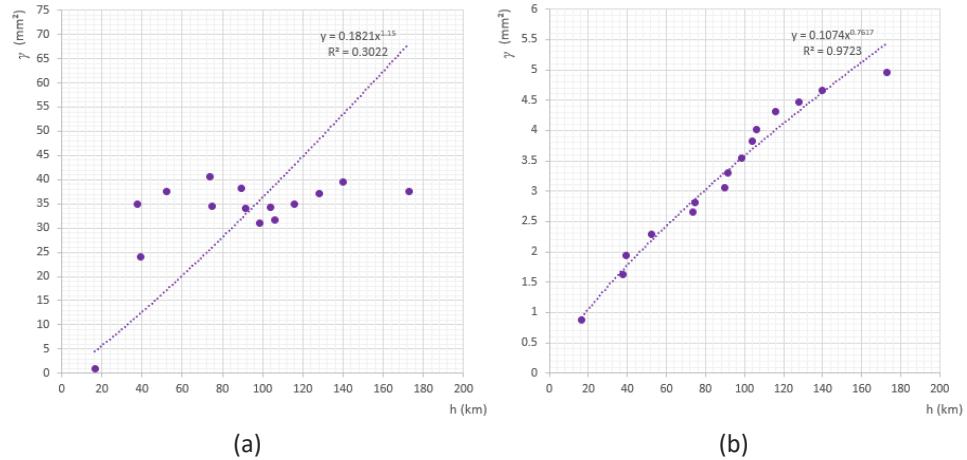
Tabela 7 – Resultados dos testes de homogeneidade regional

Cenário	Medida de Heterogeneidade
Cenário 1 (todas as estações)	11,76
Cenário 2 (SCAQ, NEIA, ANT,e CEM)	0,86
Cenário 3 (UFPR e PIR)	0,47
Cenário 4 (todas as estações, somando 11,48 mm a UFPR e PIR)	0,87

O impacto ocasionado pelas diferenças de altitude na determinação do PWV fica mais evidente na interpolação. Na Figura 8 são apresentados os semivariogramas experimentais dos conjuntos original e corrigido da diferença devido a altitude, plotando-se a distância versus a semivariância ( $\gamma$ ), juntamente com os respectivos coeficientes de determinação do modelo de potência ajustado. Enquanto os dados originais geram o denominado “efeito pepita”, onde não há covariância espacial entre as estações, o segundo indica forte correlação, melhorando o coeficiente de determinação em 83,12%. Percebe-se ainda que após 120 km de distância os valores tendem a convergir para uma estabilidade, mas a

distância máxima entre as estações nesse estudo não foi o suficiente para que isso ocorresse.

Figura 8 – Semivariogramas experimentais (a) Conjunto original (b) Conjunto corrigido da diferença devido a altitude



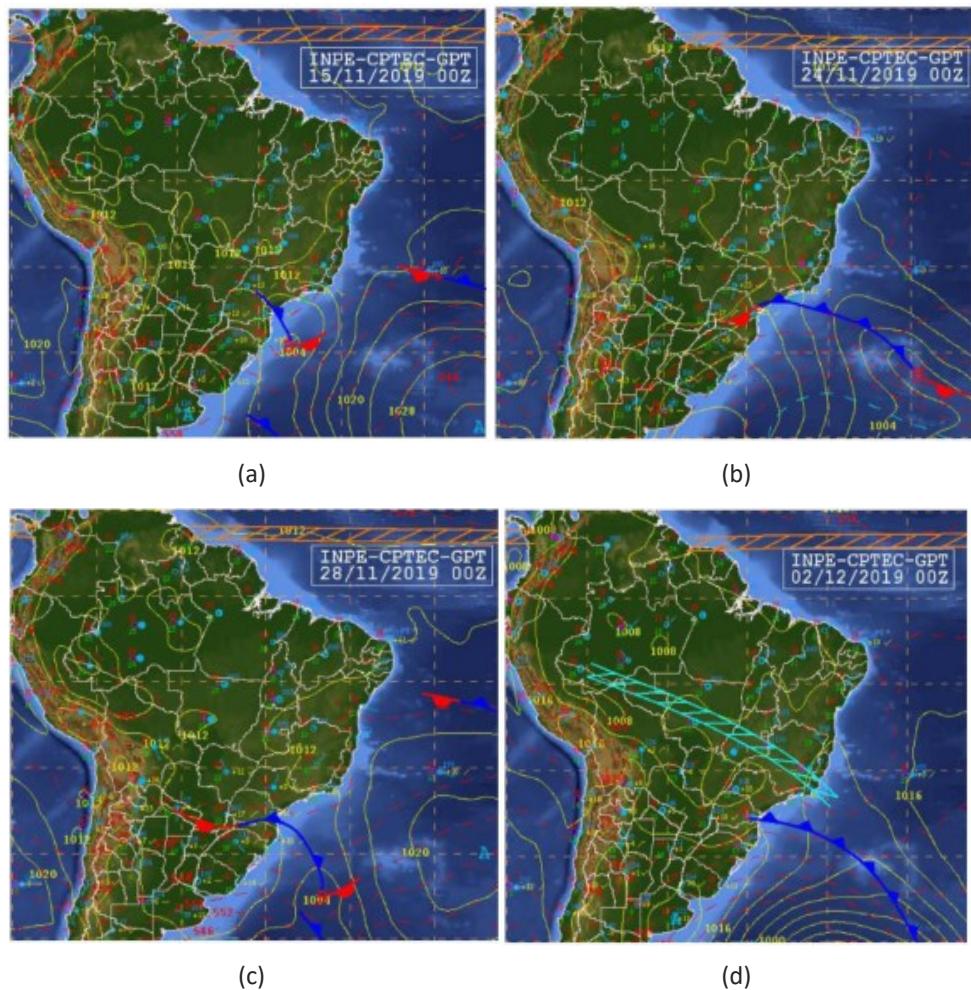
Fonte: Autoria própria (2025).

## PADRÕES DE PASSAGEM DE FRENTES

Os dados de interpolação foram extraídos para o local da estação meteorológica de Antonina/SIMEPAR, cujas coordenadas geodésicas são 25,45° S e 48,69° O, com o objetivo de comparar os valores de PWV com os registros de precipitação desta estação. Ao analisar as massas de ar pré-frontais por meio das cartas sinóticas do INPE, foi possível verificar um padrão de comportamento nas séries temporais durante a ocorrência dos eventos atmosféricos. Durante toda a campanha de campo foram verificados 4 eventos frontais sobre a região, evidenciados na Figura 9. Analisando-se a série temporal, concluiu-se que a passagem de frente ocasiona o seguinte comportamento (Figura 10):

- O PWV aumenta aproximadamente 48h antes da passagem da frente;
- 12h antes da passagem começam instabilidades no conteúdo de PWV;
- Logo após a passagem da frente há queda brusca nos índices de PWV.

Figura 9 – Passagem de massas de ar pelas cartas sinóticas (a) 15 de novembro de 2019 (b) 26 de novembro de 2019 (c) 28 de novembro de 2019 (d) 02 de dezembro de 2019



Fonte: INPE (2019).

Figura 10 – Localização das estações GNSS e atmosféricas



O gráfico da Figura 10 também indica relação entre a variação dos índices de vapor d'água e ocorrência de precipitação, porém investigações devem ser efetuadas a fim de estudar essa correlação. Esta dependência é um dos desafios

principais dos estudos PWV-GNSS, devido à complexidade de modelagem do fenômeno de precipitação, que além do vapor d'água, também depende de outras variáveis como vento e topografia local. Além disso, a quantidade de vapor não é exaurida apenas pela precipitação, mas também pela condensação em nuvens e dispersão na atmosfera, tornando esta variável de difícil monitoramento.

A distribuição espaço-temporal do conteúdo PWV-GNSS pode ser analisada por meio dos resultados das interpolações geoestatísticas. As Figuras 11 a 14 ilustram a sequência de rasters para a primeira passagem de frente detectada.

Figura 11 – Raster interpolados 48h antes da passagem da massa de ar em 15/11/2019

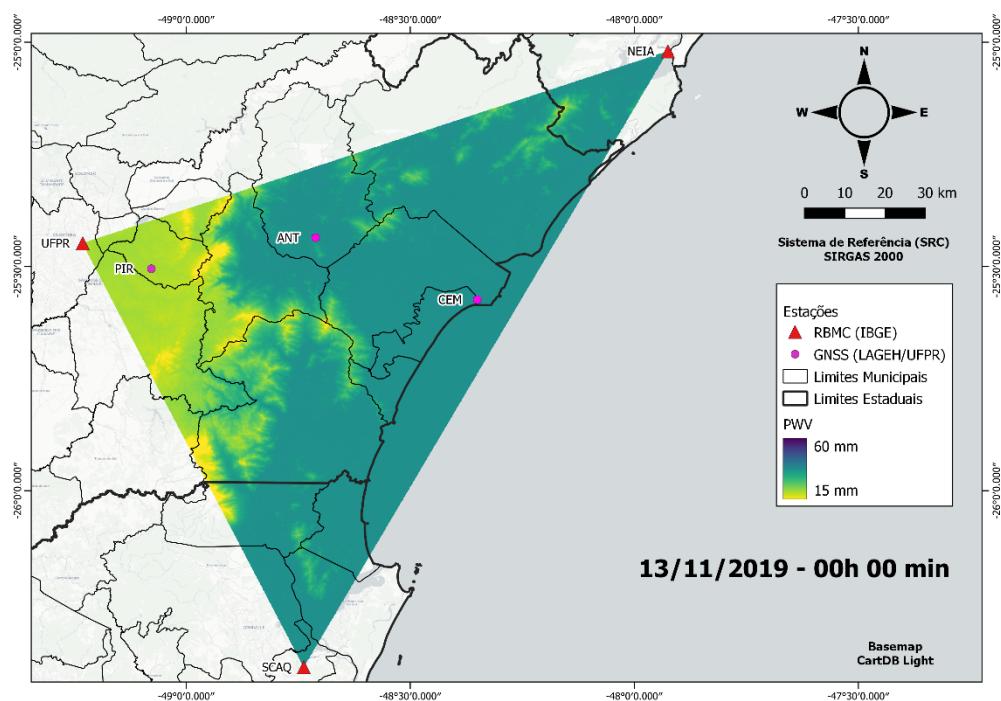
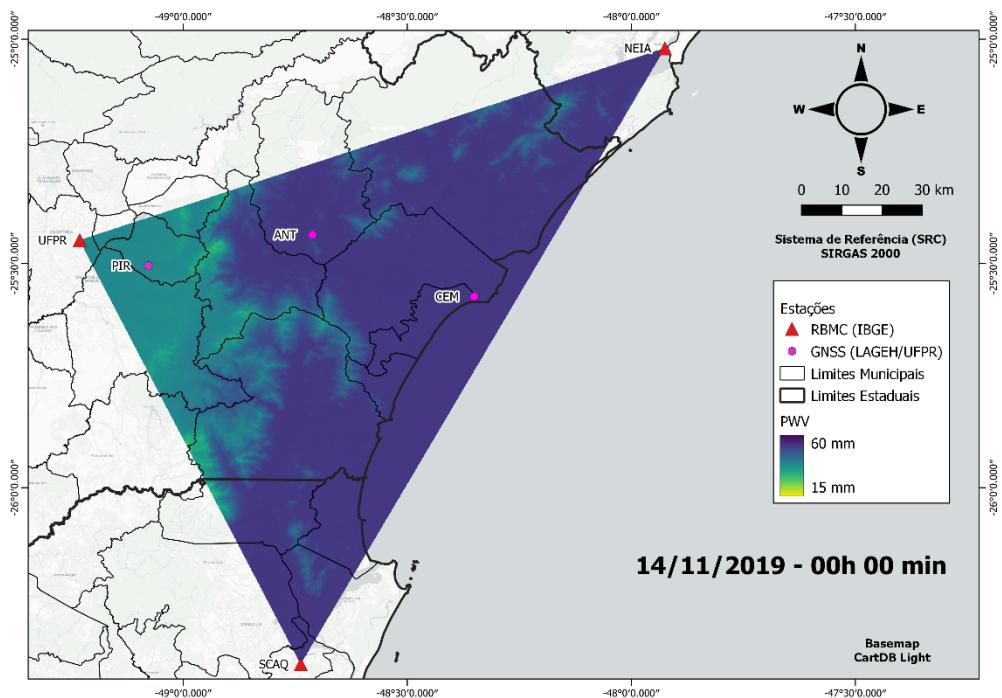
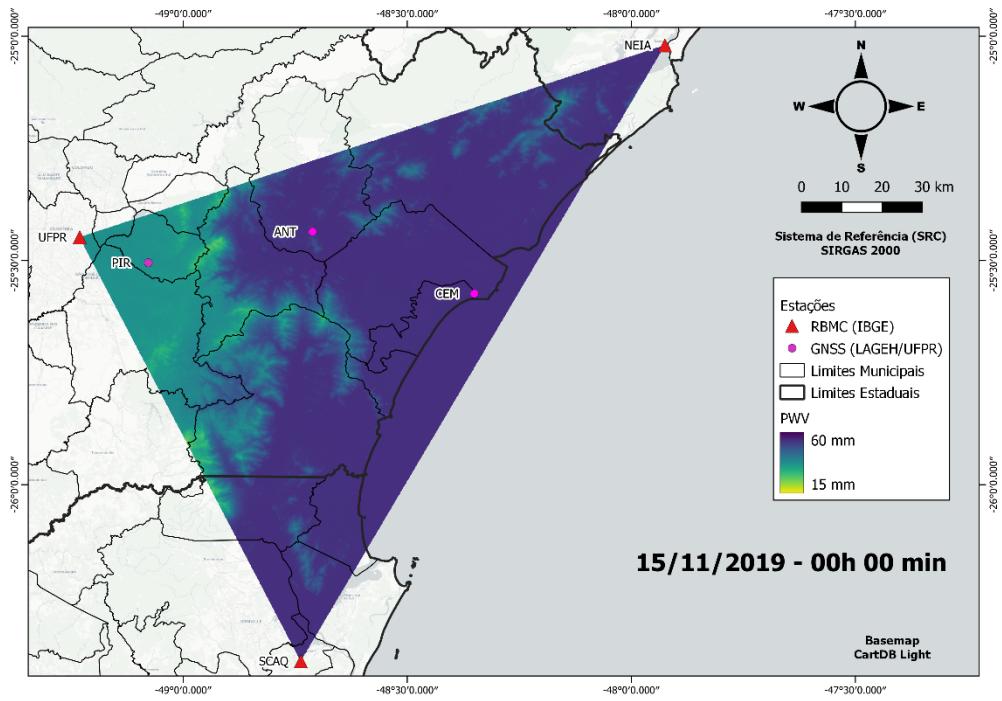


Figura 12 – Raster interpolados 24h antes da passagem da massa de ar em 15/11/2019



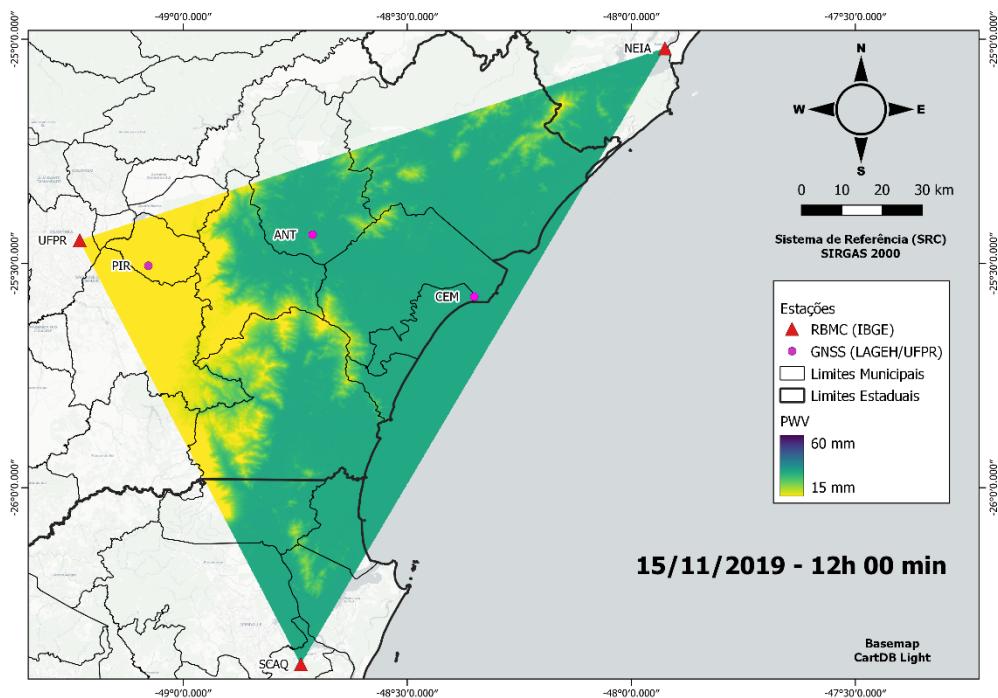
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 13 – Raster interpolados durante a passagem da massa de ar em 15/11/2019



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 14 – Raster interpolados 12h após a passagem da massa de ar em 15/11/2019



Fonte: Autoria própria (2025).

## CONCLUSÕES

Os dados PWV obtidos pelos rastreios GNSS apresentaram alta correlação, demonstrando que os fenômenos atmosféricos observados na Serra do Mar tiveram efeitos similares em todas as estações do estudo. A variação temporal foi similar em todos os pontos, apenas com a ressalva de que os dados das estações localizadas após a cadeia montanhosa tiveram mais estabilidade, sugerindo que a cadeia montanhosa age como barreira ao fluxo de vapor d'água vindo do litoral. A metodologia comprovou ainda que a altitude é elemento essencial para ser considerada em estudo de vapor d'água atmosférico, e que pode ocasionar em erros de interpretação caso não seja devidamente modelada. O comportamento das séries temporais interpoladas permitiu identificar padrões na passagem de zonas frontais e aponta ser uma técnica eficaz para estudos climáticos e meteorológicos.

Adicionalmente, durante o estudo foram identificadas oportunidades de estudo, sendo sugeridas pelo autor:

- 1) A investigação do papel da Serra do Mar na contenção de vapor d'água, estudando as estações situadas antes e depois da cadeia montanhosa;
- 2) O estudo de estações localizadas próximas a reservatórios, como o Piraquara II, de modo a compreender o efeito que massas d'água incidem sobre o vapor d'água obtido pelos rastreios GNSS;
- 3) A aplicação do método da Análise das Componentes Independentes (ICA) sobre o conjunto de dados, de forma a obter resultados complementares a análise das componentes principais; e

- 4) Realizar análise de semivariograma para krigagem com maior quantidade de estações e maiores distâncias.

# Investigation of precipitable water vapor homogeneity in the Paraná's coastal mountain range using the PPP-GNSS method

## ABSTRACT

The tropospheric zenith delay is a variable that can be obtained through GNSS techniques and indicates the delay caused by the troposphere in the propagation of signals between the satellite and the receiver. This delay can be related to precipitable water vapor through mathematical modeling, allowing for a continuous and low-cost approach to quantify this variable. In this study, time series of water vapor over three continuous weeks were analyzed, obtained from six GNSS receivers located in the region of Paraná's Sea Mountain Range, Brazil. The study demonstrated a correlation between the behavior of the variable at both stations using Pearson's correlation coefficient and principal component analysis. Regional homogeneity tests were also applied, confirming the hypothesis that the region can be considered homogeneous in terms of water vapor. Additionally, geostatistical interpolation results were evaluated using kriging. It was necessary to apply the altitude-weighted colocated kriging technique, which improved the coefficient of determination of the theoretical semivariogram fitted to the analyzed data by 83.12%. The time series showed similar patterns on four occasions when air masses passed over the region, which was confirmed by comparing them with surface synoptic charts from the Brazilian National Institute for Space Research (INPE).

**KEYWORDS:** Meteorology. Space Geodesy. Troposphere. PPP. Kriging.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições SIMEPAR, INMET e EPAGRI por disponibilizar seus dados meteorológicos para realização dessa pesquisa. Também a todos que permitiram acesso às estações meteorológicas usadas neste trabalho:

- Ao Prof. Marlos José da França do Instituto Federal Catarinense;
- À equipe da Bruschle & Lepper S.A. (Unidade BEL MAG);
- À equipe do late Club Caiobá - sede Ponta do Morro;
- À diretoria da Escola Municipal Prof. Gil Feres de Antonina;
- À equipe da APPA (Administração dos Portos de Antonina e Paranaguá);
- Ao Prof. Marcelo Renato Lamour de Universidade Federal do Paraná;
- À equipe da Prefeitura Municipal de Paranaguá;
- À Sra. Ana Carolina Pires Moreira, engenheira da SANEPAR;
- Ao Sr. Samuel Duleba, biólogo da Fundação Grupo Boticário (Reserva Natural de Salto Morato).

## REFERÊNCIAS

ADAMS, D. K. et al. A dense GNSS meteorological network for observing deep convection in the Amazon. **Atmospheric Science Letters**, Malden: Wiley-Blackwell, v. 12, n. 2, p. 207–212, 2011.

ALKEN, P.; THÉBAULT, E.; BEGGAN, C. D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. **Earth, Planets and Space**, v. 73, p. 49, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>. Acesso em: 1 jun. 2025.

ANDERSON, T. W. **An introduction to multivariate statistical analysis**. 6. ed. Nova Iorque: Wiley, 2003. 374 p.

ANDREWS, D. G. **Middle atmosphere dynamics**. Orlando: Academic Press, 1987.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BEVIS, M. et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapour using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, p. 15787–15801, 1992.

BÖHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather

Forecasts operational analysis data. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 111, n. B2, p. B02406, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>. Acesso em: 1 jun. 2025.

CAMPOS, T. L. **O potencial de PWV-GPS em predizer tempestades: estudo de caso de linhas de instabilidade**. 2018. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

CANADIAN GEODETIC SURVEY. **CSRS-PPP Updates and Information**. Natural Resources Canada, 2025. Disponível em: <https://webapp.csrs-scrs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp-info.php?locale=en>. Acesso em: 1 jun. 2025.

CARVALHO FILHO, G. L. de. **Estimativa do vapor d'água integrado utilizando dados de estações NSS terrestres para aplicações na troposfera sobre as cidades de Natal e Mossoró, no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil**. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas), Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

CAYULA, J.; CORNILLON, P. C. Edge detection algorithm for SST images. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 9, n. 1, p. 67–80, 1992.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

GOUVEIA, T. A. F. **Modelagem neutrosférica sobre a América do Sul baseada em PNT e assimilação de dados locais e robusta avaliação utilizando observações GNSS**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/86823>. Acesso em: 30 dez. 2024.

HOLTON, J. R. **An introduction to Dynamic Meteorology**. 3. ed. Academic Press, 1992. 511 p.

HOVMOLLER, E. **The trough-and-ridge diagram**. Tellus. Wiley Online. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.2153-3490.1949.tb01260.x>. Acesso em: 12 abr. 2025.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE-PPP: Serviço on-line para pós-processamento de dados GNSS**. Versão: junho de 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em:

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Serviço online para pós-processamento de dados GNSS – IBGE-PPP**. 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html>. Acesso em: 1 jun. 2025.

KURSINSKI, E. E.; HAJJ, G. A.; HARDY, K.; ROMANS, L.; SCHOFIELD, J. Observing Tropospheric Water Vapour by Radio Occultation using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research Letters**, v. 22, p. 2365–2368, 1995.

LAGLER, K.; SCHINDELECKER, M.; BÖHM, J.; KRÁSNÁ, H.; NILSSON, T. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 6, p. 1069–1073, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/grl.50288>. Acesso em: 1 jun. 2025.

LI, X.; ZUS, F.; LU, C. et al. Retrieving high-resolution tropospheric gradients from multiconstellation GNSS observations. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 10, p. 4173–4181, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2015GL063856>. Acesso em: 1 jun. 2025.

LYARD, F. H.; ALLAIN, D. J.; CANCET, M.; CARRÈRE, L.; PICOT, N. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. **Ocean Science**, v. 17, p. 615–649, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>. Acesso em: 1 jun. 2025.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: Descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. Presidente Prudente: Editora Unesp, 2008.

PETTERSEN, S. **Weather analysis and forecasting**. New York: McGraw-Hill, 1956. v. 1, 498 p.

ROBIN, C. M. I.; CRAYMER, M.; FERLAND, R.; JAMES, T. S.; LAPELLE, E.; PIRASZEWSKI, M.; ZHAO, Y. NAD83v70VG: A new national crustal velocity model for Canada. **Geomatics Canada**, Open File 0062. Natural Resources Canada, 2020. Disponível em: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.901506/publication.html>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a geodésia e a meteorologia.** 2005. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; HERDIES, D. L.; SOUZA, R. A. F. Assimilação do IWV-GPS no Brasil: otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 267–279, 2007.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2. ed. Nova Iorque: Walter de Gruyter, 2003.

SIQUEIRA, K. W. S. **Análise da correlação espacial do PWV-GNSS visando a investigação de fenômenos atmosféricos.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/70253>. Acesso em: 24 jan. 2025.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

**Recebido:** 24 fev. 2025

**Aprovado:** 06 jun. 2025

**DOI:** 10.3895/rbgeo.v13n2.19978

**Como citar:** SIQUEIRA, K. W. S.; KRUEGER, C. P.; SAPUCCI, L. F.; AMAGUA, C. G. P. Investigação da homogeneidade do vapor d'água precipitável na serra do mar paranaense empregando o método PPP-GNSS. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 214-239, jul./dez. 2025. Disponível em: <<https://periodicos.ufpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Kelvin William de Souza Siqueira

Rua Evaristo F. Ferreira da Costa, CEP 81531-990, Curitiba, Paraná, Brasil.

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

