

**TAYNÁ APARECIDA FERREIRA GOUVEIA**

**FUNÇÃO DE MAPEAMENTO BRASILEIRA DA  
ATMOSFERA NEUTRA E SUA APLICAÇÃO NO  
POSICIONAMENTO GNSS NA AMÉRICA DO SUL**



**TAYNÁ APARECIDA FERREIRA GOUVEIA**

**FUNÇÃO DE MAPEAMENTO BRASILEIRA DA  
ATMOSFERA NEUTRA E SUA APLICAÇÃO NO  
POSICIONAMENTO GNSS NA AMÉRICA DO SUL**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Presidente Prudente, para obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas.

**Orientador:** Dr. João Francisco Galera Monico  
**Coorientadores:** Dra. Daniele Barroca Marra Alves  
Dr. Luiz Fernando Sapucci

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente

G741f Gouveia, Tayná Aparecida Ferreira.  
Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul / Tayná Aparecida Ferreira Gouveia. - 2019  
129 f. : il.

Orientador: João Francisco Galera Monico  
Coorientadores: Daniele Barroca Marra Alves, Luiz Fernando Sapucci  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2019  
Inclui bibliografia

1. Função de mapeamento. 2. Traçado de raio. 3. Modelagem da atmosfera neutra. 4. PNT regional. 5. PPP GNSS. I. Monico, João Francisco Galera. II. Alves, Daniele Barroca Marra. III. Sapucci, Luiz Fernando. IV. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. V. Título.

Alessandra Kuba Oshiro Assunção  
CRB-8/9013



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: FUNÇÃO DE MAPEAMENTO BRASILEIRA DA ATMOSFERA NEUTRA E SUA APLICAÇÃO NO POSICIONAMENTO GNSS NA AMÉRICA DO SUL

AUTORA: TAYNA APARECIDA FERREIRA GOUVEIA  
ORIENTADOR: JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO  
COORIENTADOR: LUIZ FERNANDO SAPUCCI  
COORIENTADORA: DANIELE BARROCA MARRA ALVES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. LUIZ PAULO SOUTO FORTES  
Faculdade de Engenharia / Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. FELIPE GEREMIA NIEVINSKI  
Departamento de Geodésia / Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. HAROLDO ANTONIO MARQUES  
Seção de Engenharia Cartográfica / Instituto Militar de Engenharia

Prof. Dr. ANTONIO OCIMAR MANZI  
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Presidente Prudente, 26 de abril de 2019.



## DEDICATÓRIA

À minha mãe, Evanil, em memória, por todo amor, e por um dos seus ensinamentos de jamais desistir, sempre finalizar os compromissos aos quais me responsabilizava, me dizia: “Se desistir agora, jamais irá concluir algo. Vá até o final e depois de concluir, avalie.” Que mesmo com a tristeza da minha ausência em casa, sempre me apoiou para que realizasse meu sonho, a faculdade. Por essa razão, a conclusão dessa etapa é também a conquista dela, onde quer que ela esteja.

À minha família, minha avó, meus padrinhos (pais de coração e de presença), minhas tias e tios, meus primos e primas, pelo carinho, paciência e compreensão por estarmos tão longe uns dos outros, por todo apoio e torcida; minha sogra e cunhado, pelo auxílio, apoio e carinho. Ao meu pai, Alberto, à Cris e meus irmãos pelo carinho e por torcerem por mim.

Ao meu esposo, Rapha, meu maior companheiro e apoiador, ao longo desses quinze anos. Pela parceria desde a graduação, pela incondicional compreensão com as minhas ausências, pelo carinho, por me apoiar e estar comigo nos momentos mais difíceis, por torcer e partilhar dos bons momentos, me encorajando e auxiliando sempre, essa tese dedico.

## AGRADECIMENTOS

A realização dessa tese de doutorado só foi possível graças à colaboração direta ou indireta de muitas pessoas, com apoios e incentivos sem os quais, tal conclusão não seria uma realidade e aos quais serei eternamente grata.

Ao longo de todo o processo de doutoramento há uma dedicação exclusiva profissional, mas também pessoal, de vida. Nesse período pude contar com a colaboração de grandes pesquisadores com capacidades técnicas e motivadoras, e com a paciência, carinho e apoio do meu esposo, familiares e amigos.

Agradeço à agência de fomento pela bolsa concedida no período dedicado à realização da tese: “O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”.

Agradeço aos pesquisadores e cientistas que muito me motivaram quanto à beleza e a importância da ciência e da pesquisa, os quais compartilharam ensinamentos, experiências e pela contribuição valiosa no meu desenvolvimento como pesquisadora. Sendo assim, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. João Francisco Galera Monico durante os quatro anos de orientação. Por todas suas sugestões e colaborações na pesquisa, assim como por toda paciência e incentivos ao longo do processo de construção do conhecimento. Agradeço também aos meus co-orientadores: à Prof. Dr. Daniele Barroca Marra Alves, da FCT-UNESP do Departamento de Cartografia, e ao Prof. Dr. Luiz Fernando Sapucci, do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), incentivadores e grandes colaboradores na construção e realização dessa tese. O meu sincero agradecimento ao Prof. Dr. Felipe Nievinski Geremia do Departamento de Geodésia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por sua disposição e auxílio, contribuindo sempre de maneira muito gentil e paciente com valiosas discussões e sugestões.

Agradeço também aos membros da banca de defesa de tese os professores, Prof. Dr. Luiz Paulo Souto Fortes, Prof. Dr. Felipe Geremia Nievinski, Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques e o Prof. Dr. Antonio Ocimar Manzi pelas sugestões e contribuições objetivando o aperfeiçoamento da tese.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e à UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), campus de Presidente Prudente, pela infraestrutura e pelas oportunidades

oferecidas. Aos professores do departamento de Matemática e Computação e de Cartografia da FCT-UNESP por todos os estímulos para a construção do conhecimento matemático e lógico, e sua aplicação no Posicionamento e Sensoriamento Remoto Geodésico, da graduação ao doutorado, que contribuíram na minha formação acadêmica e científica. Ao Grupo de Estudo em Geodésia Espacial (GEGE), por todas as oportunidades, pelas sugestões, discussões e pelas trocas experiências.

Agradeço também aos funcionários que se tornaram amigos, com os quais pude compartilhar de muitos momentos e que levarei para a vida, em especial à Cida, Zilda, Cíntia, Ítalo, Rogério, Ivonete, Erynate e Cátia, por toda atenção, auxílio e carinho despendidos.

Agradeço aos amigos do PPGCC, por me acolherem e auxiliarem na transição entre as áreas de formação (Matemática e Ciências Cartográficas), pelo apoio, carinho e parceria nesse mundo desafiador e exigente de pós-graduação. Em especial à Samara, Chaenne, Miriam, Daniele, Mariana (Vizi), Gabriela, Crislaine, Marcela, Fernanda, Gabriel, Prol, Vinicius, Bruno, Raquel, Paulo Sérgio, Paulo Setti, Gui Cardim, Alisson, Renato, Nariane e Daniel.

Agradeço ao CPTEC-INPE pelo fornecimento dos dados para o desenvolvimento dessa tese, e por sua infraestrutura. Aos amigos que lá fiz e que muito me auxiliaram e apoiaram em muitos momentos. Em especial à Bruna, Bianca, Carlos, Fábio, Leonardo e Helena. Agradeço também ao departamento de geodésia da UFRGS por toda a infraestrutura e amigos que lá fiz, Luiza, Jennifer, Thalia (amiga de *raytracer*, da UNB do Canada) e à Selmara (minha anfitriã).

Aos meus amigos (do Sistema Tempo de Ser), que os anos em Prudente me proporcionaram, pelo carinho, apoio, encorajamentos e compreensão da minha ausência, pela dedicação à tese.

Por fim, essa tese é de minha autoria, porém sem a colaboração, o carinho e apoio que recebi, sua conclusão seria ainda mais difícil de ser realizada, a todos o meu carinho e a minha gratidão.

## RESUMO

A tecnologia *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) tem sido amplamente utilizada em posicionamento, desde as aplicações cotidianas (acurácia métrica), até aplicações que requerem alta acurácia (poucos cm ou dm). Quando se pretende obter alta acurácia, diferentes técnicas devem ser aplicadas a fim de minimizar os efeitos que o sinal sofre desde sua transmissão, no satélite, até sua recepção. O sinal GNSS ao se propagar na atmosfera neutra (da superfície até 50 km), é afetado por gases hidrostáticos e vapor d'água. A variação desses constituintes atmosféricos causa uma refração no sinal que gera um atraso. Esse atraso pode ocasionar erros na medida de no mínimo 2,5 m (zenital) e superior a 25 m (inclinado). A determinação do atraso na direção inclinada (satélite-receptor) de acordo com o ângulo de elevação é realizada pelas funções de mapeamento. Uma das técnicas para o cálculo do atraso é o traçado de raio (*ray tracing*). Essa técnica permite mapear o caminho real que o sinal percorreu e modelar a interferência da atmosfera neutra sobre esse sinal. Diferentes abordagens podem ser usadas para obter informações que descrevem os constituintes da atmosfera neutra. Dentre as possibilidades pode-se citar o uso de medidas de radiossondas, modelos de previsão do tempo e clima (PNT), medidas GNSS, assim como modelos teóricos. Modelos de PNT regionais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) apresentam-se como uma boa alternativa para disponibilizar as medidas atmosféricas, que descrevem o clima altamente variável, de acordo com a época e região do Brasil. Nessa pesquisa, essas medidas foram obtidas a partir do modelo de PNT de maior resolução temporal (horária) e espacial (5km), adotado em 2018 como modelo operacional regional pelo CPTEC/INPE, denominado *Weather Research and Forecasting* (WRF). Com as variáveis atmosféricas obtidas a partir do WRF foi aplicada a técnica de traçado de raio possibilitando o desenvolvimento de uma função de mapeamento da atmosfera neutra, para o Brasil e América do Sul, denominada *Brazilian Mapping Function* (BMF). A partir da função de mapeamento desenvolvida foi possível obter o conhecimento e desenvolver essa metodologia, até então não realizado no Brasil. Essa função foi avaliada em duas abordagens: em relação à qualidade do atraso; e aplicação no posicionamento por ponto preciso (PPP). Na primeira avaliação considerou-se como medidas de referência dados de radiossondas, em quatro estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), localizadas em regiões com características climáticas distintas (NAUS, CUIB, POLI, POAL). O período avaliado constituiu um ano de dados, por meio do qual foi possível verificar a qualidade da função na determinação do atraso zenital nas diferentes estações do ano. Esses resultados mostraram que o atraso zenital obtido a partir da BMF apresentou REQM de no máximo 6 cm (em POAL) em relação aos dados de referência. Também foram geradas séries do atraso e fator inclinado, embora não tivessem dados de referência para avaliação estatística, apresentaram variabilidade semelhante ao atraso zenital. Além dessas análises, uma análise preliminar foi realizada para avaliar a BMF no PPP, com diferentes estratégias: duas estações; PPP modo estático e cinemático; e diferentes épocas de inicialização. Para avaliar a qualidade do mesmo, considerou-se como referência o modelo mais recomendado para uso, a *Vienna Mapping Function 1* (VMF1) que resulta do modelo global de PNT do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). A BMF apresentou resultados promissores no posicionamento pós processado de alta acurácia nas regiões brasileiras avaliadas. O melhor desempenho da BMF foi obtido quando aplicada na determinação dos valores a priori na estimativa do atraso no PPP e mais próximo da análise do modelo de PNT, o WRF às 12 UTC.

Palavras chave: Função de mapeamento. Traçado de raio. Modelagem da atmosfera neutra. PNT regional. PPP GNSS.

## ABSTRACT

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) technology has been widely used in positioning, from day-to-day applications (metric accuracy) to applications that require high accuracy (few cm or dm). For high accuracy, different techniques may be applied to minimize the effects that the signal suffers from its transmission on the satellite to its reception. GNSS signal when propagating in the neutral atmosphere (from surface up to 50km) is influenced by hydrostatic gases and water vapor. The variation of these atmospheric constituents causes a refraction in the signal that generates a delay. This delay may cause errors of at least 2.5 m (zenith) and greater than 25 m (slant). The determination of the delay in the slanted direction (satellite-receiver) according to the elevation angle is performed by the mapping functions. One of the techniques for calculating the delay is raytracing. This technique allows us to map the actual path that the signal has traveled and to model the interference of the neutral atmosphere on it. Different approaches can be used to obtain information describing the neutral atmosphere constituents - temperature, pressure and humidity. The possibilities include the use of radiosonde measurements, weather and climate models (NWP), GNSS measurements, as well as theoretical models. Regional NWP models from the Center Weather Forecasting and Climate Studies (CPTEC) of the National Institute for Space Research (INPE) are a good alternative to provide atmospheric measurements, which describe the highly variable climate, according to the season and region of Brazil. In this research, these measurements were obtained from the NWP model of higher temporal (hourly) and spatial (5km) resolution, which started operations in 2018 as a regional model by CPTEC/INPE, named Weather Research and Forecasting (WRF). Considering the atmospheric variables obtained from the WRF, by applying the raytracing technique, the neutral atmosphere mapping function for Brazil and South America was developed, named Brazilian Mapping Function (BMF). BMF was used to obtain the knowledge and develop this methodology, which so far had not been carried out in Brazil. This function was evaluated in two approaches: regarding the quality of the delay; and precise point positioning (PPP) quality using BMF. In the first assessment of the zenith delay, we considered as reference the results from radiosonde and from data of four stations of the Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS Systems (RBMC), located in regions with distinct climatic characteristics (NAUS; CUIB; POLI; POAL). The period assessed was of one year of data, through which it was possible to verify the quality of the function in computing the zenith delay in the different seasons of the year. These results showed that the zenith delay obtained from BMF presented a maximum RMSE of 6 cm (in POAL) in relation to the reference data. Delay and inclined factor series were also generated, although they did not have reference data for statistical evaluation. They showed similar variability to the zenith delay (factor is the ratio between the inclined and zenith delays). In addition to these assessments, a preliminary analysis was performed to evaluate the contribution of BMF in PPP, with different strategies: one day of data processing; two stations; PPP static and kinematic mode; and different initialization times. In the quality assessment, the Vienna Mapping Function 1 (VMF1) was considered as a reference, whose results are from the global model of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). BMF also showed promising results for the post-processing positioning mode of high accuracy in the evaluated Brazilian regions. The best performance was obtained when it was applied to determine the a priori value of the PPP delay estimate, and closest to the NWP model analysis, the WRF at 12 UTC.

Keywords: Mapping function. Ray tracing. Neutral atmosphere modeling. Regional NWP. GNSS PPP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas da atmosfera terrestre .....	23
Figura 2 – Divisões da atmosfera terrestre de acordo com a área de aplicação .....	25
Figura 3 – Variação da pressão (P), temperatura (T), umidade relativa (Umrl), pressão de saturação (E <sub>su</sub> ), pressão parcial do vapor d'água (P <sub>w</sub> ) e atraso úmido vertical (D <sub>w</sub> ), em relação a altitude para estação de Manaus em 01 de janeiro de 2016.....	33
Figura 4 – Variação da pressão parcial do vapor d'água (P <sub>w</sub> ), da umidade relativa (Umrl), e atraso úmido vertical (D <sub>w</sub> ), em relação temperatura (T), para estação de Manaus em 01 de janeiro de 2016. ....	33
Figura 5 - Processo de Previsão Numérica de Tempo com Assimilação de Dados .....	36
Figura 6 – Linha do tempo em relação a análise, previsões e hora do dia .....	39
Figura 7 - Efeito da atmosfera neutra nos sinais GNSS. ....	40
Figura 8 - Linha do tempo do estado da arte das funções de mapeamento, em destaque as funções que usam PNT. ....	52
Figura 9 – Climatologia trimestral brasileira da precipitação. ....	59
Figura 10 – Climatologia trimestral brasileira da temperatura no verão e no inverno.....	59
Figura 11 – Estações da RBMC, em destaque as estações selecionadas.....	60
Figura 12 – Estações de lançamento das radiossondas, em destaque as estações selecionadas. ....	61
Figura 13 – Fluxograma das etapas da metodologia geral da BMF .....	63
Figura 14 - Fluxograma da metodologia aplicada na avaliação do atraso zenital pela BMF/WRF em relação ao uso de radiossondas. ....	69
Figura 15 - Série anual do atraso zenital não hidrostático a partir da modelagem da BMF (azul) e das radiossondas (verde) por estação.....	70
Figura 16 - Série anual do atraso zenital total a partir da modelagem da BMF (azul) e das radiossondas (verde) por estação. ....	71
Figura 17 - Análise do viés e da REQM do atraso zenital hidrostático (ZHD), não hidrostático (ZNHD), e total (ZTD) para as estações NAUS-CUIB-POLI_POAL. ....	73
Figura 18 - Série semanal do atraso zenital não hidrostático e total a partir da modelagem da BMF (azul) e das radiossondas (verde) das estações NAUS e POAL. ....	74
Figura 19 - Análise do viés e da REQM do atraso zenital hidrostático (ZHD), não hidrostático (ZNHD), e total (ZTD) para às estações NAUS e POAL. ....	75

Figura 20 - Fluxograma da metodologia aplicada na avaliação do atraso inclinado pela BMF/WRF.....	77
Figura 21 - Série anual do atraso inclinado não hidrostático (SNHD) a partir da modelagem da BMF por estação.....	78
Figura 22 - Série anual do atraso inclinado total a partir da modelagem da BMF por estação	79
Figura 23 - Análise da média do atraso inclinado hidrostático (SHD), não hidrostático (SNHD), e total (STD) para as estações NAUS-CUIB-POLI_POAL.....	80
Figura 24 - Série semanal do atraso inclinado não hidrostático e total a partir da modelagem da BMF/WRF das estações NAUS e POAL. ....	82
Figura 25 -Análise da média e do DP do atraso zenital hidrostático (SHD), não hidrostático (SNHD), e total (STD) para as estações NAUS e POAL.....	82
Figura 26 - Fluxograma da metodologia aplicada na avaliação do fator inclinado pela BMF/WRF.....	84
Figura 27 -Série anual do fator inclinado não hidrostático da BMF por estação. ....	85
Figura 28 - Análise da correlação do atraso não hidrostático inclinado (SNHD) e zenital (ZNHD) em relação ao fator inclinado não hidrostático e à chuva para o dia 27/4/16 POAL.	86
Figura 29 - Série anual do fator inclinado total a partir da modelagem da BMF por estação..	86
Figura 30 - Análise da média do fator inclinado hidrostático (FIH), não hidrostático (FINH), e total (FIT) para as estações NAUS-CUIB-POLI-POAL.....	87
Figura 31 - Série semanal do fator inclinado não hidrostático e total a partir da modelagem da BMF/WRF das estações NAUS e POAL. ....	88
Figura 32 - Análise da média do fator inclinado hidrostático (FIH), não hidrostático (FINH), e total (FIT) para as estações NAUS e POAL.....	89
Figura 33 - Fluxograma da metodologia aplicada no desenvolvimento da grade da BMF.....	90
Figura 34 - Exemplo dos arquivos da BMF para um dia e 24 épocas.....	91
Figura 35 - Fluxograma da metodologia aplicada no PPP .....	93
Figura 36 - PPP estático na estação NAUS considerando todas as estratégias no cálculo do atraso (VMF, BMF, Est_VMF e Est_BMF) para o dia 07/01/17.....	94
Figura 37 - Acurácia 2D e altimétrica (Alt) do PPP estático na estação NAUS considerando todas as estratégias no cálculo do atraso (VMF, BMF, Est_VMF e Est_BMF) para o dia 07/01/17.....	94
Figura 38 - PPP estático na estação POAL considerando todas as estratégias no cálculo do atraso (VMF, BMF, Est_VMF e Est_BMF) para o dia 07/01/17 .....	95

Figura 39 - Acurácia 2D e altimétrica (Alt) do PPP estático na estação POAL considerando todas as estratégias no cálculo do atraso (VMF, BMF, Est_VMF e Est_BMF) para o dia 07/01/17 .....	95
Figura 40 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP estático na estação NAUS da estimativa do atraso com o modelo BMF (Est_BMF) .....	96
Figura 41 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP estático na estação NAUS da estimativa do atraso com o modelo VMF (Est_VMF) .....	97
Figura 42 – Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP estático na estação POAL da estimativa do atraso com o modelo BMF (Est_BMF) .....	97
Figura 43 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP estático na estação POAL da estimativa do atraso com o modelo VMF (Est_VMF) .....	98
Figura 44 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo BMF e 24h de dados .....	103
Figura 45 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo VMF e 24h de dados .....	103
Figura 46 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo Est_BMF e 24h de dados .....	104
Figura 47 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo Est_VMF e 24h de dados .....	104
Figura 48 – Discrepância 2D, altimétrica (U) e tempo de convergência para os modelos (BMF, VMF) e das estimativas (Est_BMF e Est_VMF) no PPP cinemático na estação NAUS e 24 horas de dados .....	105
Figura 49 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo BMF e 24h de dados.....	106
Figura 50 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo VMF e 24h de dados .....	106
Figura 51- Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo Est_BMF e 24h de dados.....	107
Figura 52 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo Est_VMF e 24h de dados .....	107
Figura 53 - Discrepância 2D, altimétrica (U) e tempo de convergência para os modelos (BMF, VMF) e das estimativas (Est_BMF e Est_VMF) no PPP cinemático na estação POAL e 24 horas de dados .....	108



Figura 54 - Atraso não hidrostático (ZNHD) e total (ZTD) calculado para cada um dos modelos (BMF, VMF) e suas estimativas (Est_BMF e Est_VMF) no PPP cinemático na estação POAL e 24 horas de dados.....	109
Figura 55 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo BMF das 12h às 18h .....	110
Figura 56 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo VMF das 12h às 18h .....	110
Figura 57 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo Est_BMF das 12h às 18h .....	111
Figura 58 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo Est_VMF das 12h às 18h .....	111
Figura 59 - Discrepância 2D, altimétrica (U) e tempo de convergência para os modelos (BMF, VMF) e das estimativas (Est_BMF e Est_VMF) no PPP cinemático na estação NAUS com 6h de dados .....	112
Figura 60 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo BMF das 12h às 18h.....	113
Figura 61 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo VMF das 12h às 18h.....	113
Figura 62 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo Est_BMF das 12h às 18h.....	114
Figura 63 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo Est_VMF das 12h às 18h.....	114
Figura 64 - Discrepância 2D, altimétrica (U) e tempo de convergência para os modelos (BMF, VMF) e das estimativas (Est_BMF e Est_VMF) no PPP cinemático na estação POAL com 6h de dados .....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do traçado de raio .....	49
Tabela 2 - Síntese da análise do viés e da REQM do atraso zenital hidrostático (ZHD), do não hidrostático (ZNHD), e total (ZTD) em relação às estações NAUS-CUIB-POLI-POAL. ....	73
Tabela 3 - Síntese da análise do viés e da REQM do atraso zenital hidrostático (ZHD), do não hidrostático (ZNHD), e total (ZTD) em relação as estações NAUS e POAL. ....	76
Tabela 4 - Síntese da análise da média do não hidrostático (SNHD), e total (STD) em relação às estações NAUS-CUIB-POLI-POAL.....	78
Tabela 5 - Síntese da análise da média e do DP do atraso inclinado hidrostático (SHD), do não hidrostático (SNHD), e total (STD) em relação as estações NAUS-CUIB-POLI_POAL.....	80
Tabela 6 - Síntese da análise da média e do DP do atraso zenital hidrostático (SHD), do não hidrostático (SNHD), e total (STD) em relação as estações NAUS e POAL. ....	82
Tabela 7 -Síntese da análise da média do fator inclinado hidrostático (FIH), do não hidrostático (FINH), e total (FIT) em relação às estações NAUS-CUIB-POLI-POAL.....	87
Tabela 8 -Síntese da análise da média do atraso inclinado hidrostático (FIH), do não hidrostático (FINH), e total (FIT) em relação às estações NAUS-POAL.....	89
Tabela 9 - Síntese da análise da REQM (cm) das discrepâncias 2D e da altitude da estação NAUS .....	99
Tabela 10 - Síntese da análise da acurácia (cm) 2D e da altitude da estação NAUS.....	100
Tabela 11 - Síntese da análise da REQM (cm) das discrepâncias 2D e da altitude da estação POAL.....	100
Tabela 12 - Síntese da análise da acurácia (cm) 2D e da altitude da estação POAL .....	101
Tabela 13 - Tempo requerido para a convergência da solução do PPP cinemático considerando discrepância e precisão. ....	116
Tabela 14 - Média das discrepâncias e precisão da estação NAUS .....	117
Tabela 15 - Média das discrepâncias e precisão da estação POAL.....	117

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 TRABALHOS RELACIONADOS E POTENCIAL CONTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
<b>1.4 ESTRUTURA DA TESE .....</b>	<b>21</b>
<b>2. ATMOSFERA NEUTRA E SEUS EFEITOS NO POSICIONAMENTO GNSS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 DEFINIÇÃO DA ATMOSFERA NEUTRA: METEOROLOGIA E GEODÉSIA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA NO POSICIONAMENTO GNSS .....</b>	<b>26</b>
<i>2.2.1 Composição do atraso de propagação.....</i>	<i>27</i>
<b>2.3 FONTES DE DADOS PARA A MODELAGEM DO ATRASO .....</b>	<b>28</b>
<i>2.3.1 Cálculo do atraso por radiossondas .....</i>	<i>31</i>
<i>2.3.2 Modelagem do atraso a partir de PNT do CPTEC/INPE.....</i>	<i>34</i>
2.3.2.1 Previsão Numérica de Tempo e Assimilação de dados.....	34
2.3.2.2 WRF regional .....	37
<i>2.3.3 Vantagens e desvantagens das fontes de dados.....</i>	<i>39</i>
<b>3. MODELOS MATEMÁTICOS ENVOLVIDOS NO CÁLCULO DO ATRASO E NO POSICIONAMENTO GNSS.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1 REFRAÇÃO DA ATMOSFERA NEUTRA E O ATRASO DE PROPAGAÇÃO .....</b>	<b>40</b>
<i>3.1.1 Modelagem da refratividade .....</i>	<i>40</i>
<i>3.1.2 Modelagem do atraso a partir da refratividade.....</i>	<i>43</i>
<b>3.2 TRAÇADO DE RAIOS (RAY TRACING) .....</b>	<b>46</b>
<i>3.2.1 Traçado de raios aplicado para o cálculo do atraso.....</i>	<i>47</i>
<b>3.3 FUNÇÃO DE MAPEAMENTO.....</b>	<b>50</b>
<i>3.3.1 Funções de Mapeamento na modelagem do atraso .....</i>	<i>52</i>
<b>3.4 POSICIONAMENTO GNSS.....</b>	<b>53</b>
<b>4. DESENVOLVIMENTO DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO BRASILEIRA (BMF) 56</b>	
<b>4.1 DESCRIÇÃO E AMOSTRAGEM DOS DADOS .....</b>	<b>56</b>
<i>4.1.1 Dados do WRF/PNT.....</i>	<i>56</i>
<i>4.1.2 Dados das radiossondas.....</i>	<i>58</i>
<b>4.2 REGIÕES SELECIONADAS .....</b>	<b>58</b>

4.3	<b>METODOLOGIA DO TRAÇADO DE RAIOS – BMF</b>	61
4.4	<b>METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO</b>	64
<b>5.</b>	<b>METODOLOGIA, EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES DO ATRASO E FUNÇÃO DE MAPEAMENTO</b>	<b>67</b>
5.1	<b>METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA BMF NA MODELAGEM DO ATRASO ZENITAL</b>	67
5.1.1	<i>Resultados e análises da BMF na modelagem do atraso zenital: série anual (análises)</i>	70
5.1.2	<i>Resultados e análises da BMF na modelagem do atraso zenital: série semanal (previsões)</i>	73
5.2	<b>AVALIAÇÃO DA BMF NA MODELAGEM DO ATRASO INCLINADO</b>	76
5.2.1	<i>Resultados e análises da BMF na modelagem do atraso inclinado: série anual</i>	77
5.2.2	<i>Resultados e análises da BMF na modelagem do atraso inclinado: série semanal</i>	80
5.3	<b>AVALIAÇÃO DA BMF NA MODELAGEM DO FATOR INCLINADO</b>	83
5.3.1	<i>Resultados e análises da BMF na modelagem do fator inclinado: série anual</i>	84
5.3.2	<i>Resultados e análises da BMF na modelagem do fator inclinado: série semanal</i>	87
5.4	<b>GRADE DA BMF PARA A AMÉRICA DO SUL</b>	89
<b>6.</b>	<b>METODOLOGIA, EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES DA BMF NO PPP</b>	<b>92</b>
6.1	<b>METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA BMF NO PPP</b>	92
6.1.1	<i>Avaliação da BMF no PPP estático: diferentes modelagens do atraso</i>	93
6.1.2	<i>Avaliação da BMF no PPP estático com diferentes épocas de inicialização</i>	98
6.1.3	<i>Avaliação da BMF no PPP cinemático: diferentes modelagens do atraso</i>	101
6.1.4	<i>Avaliação da BMF no PPP cinemático: análise e tempo requerido para a inicialização</i>	109
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>118</b>
7.1	<b>CONCLUSÕES</b>	118
7.2	<b>RECOMENDAÇÕES</b>	121
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>122</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização geral

Os sinais de radiofrequência, como os sinais dos Sistemas Globais de Posicionamento por Satélites (em inglês, *Global Navigation Satellite Systems - GNSS*), ao serem propagados na atmosfera terrestre são impactados por diferentes efeitos que resultam em erros no posicionamento GNSS. Para fins de propagação de sinal a atmosfera é dividida em duas camadas teóricas, de acordo com os elementos que constituem cada uma delas e dos efeitos que esses elementos causam no sinal, sendo: a camada ionizada, denominada ionosfera, e a camada neutra, ou atmosfera neutra. Os efeitos ionosféricos de primeira ordem representam cerca de 99,9% do atraso ionosférico total; o restante refere-se aos erros de ordem superior, segunda e terceira ordem. Esses efeitos de maior magnitude podem ser eliminados a partir de medidas de dupla frequência pela combinação livre de ionosfera (*ion free*) (IERS, 2010; MARQUES et al., 2011; MARQUES et al., 2014). Logo, o efeito que o sinal GNSS sofre ao ultrapassar a atmosfera neutra pode resultar no erro de maior magnitude no posicionamento (MONICO, 2008).

A atmosfera neutra (GGOS, 2019), com extensão média de 50 km, composta também pela troposfera (superfície até 15-18km) (VIANELLO & ALVES, 2000), é um meio não dispersivo para as frequências de até 15 GHz, como é o caso dos sinais GNSS. Essa camada é composta por gases hidrostáticos (SPILKER, 1994) e vapor d'água, que são variáveis. Ao passar por esses meios de densidades diferentes (com diferentes índices de refração) o sinal GNSS é refratado. A refração causa uma curvatura no sinal, ou seja, a distância entre satélite e receptor não pode ser determinada apenas pela equação de distância geométrica entre dois pontos. Logo, o sinal ao ser refratado sofre um atraso, que impacta não só a sua velocidade como também sua direção. Além disso, esses efeitos apresentam magnitude variável de acordo com: a altitude; a sazonalidade (estações do ano); a região geográfica; ano-a-ano; e a porção da atmosfera que atravessam (ângulo de elevação e azimute).

Por essa razão, obter a direção e o comprimento do sinal GNSS ao longo de todo o seu trajeto, de forma acurada, torna-se uma tarefa não facilmente solucionada. A modelagem do atraso do sinal ao passar pela atmosfera neutra envolve equações matemáticas e informações (dados de entrada) dos constituintes atmosféricos (pressão, temperatura e umidade) que descrevem o estado dessa camada em um determinado instante, localização (coordenadas planimétricas e altimétrica) e direção (ângulo de elevação entre a transmissão e

recepção do sinal). Na comunidade geodésica os efeitos que o sinal GNSS sofre ao ultrapassar a camada neutra são denominados de troposféricos, ou efeitos de propagação troposféricos (TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017). Mas essa denominação simplifica a realidade, pois embora o maior impacto no sinal seja em relação aos gases e vapor d'água presentes nos primeiros quilômetros da atmosfera neutra, na troposfera (da superfície até 15-18km), este efeito é a soma da refração ao percorrer toda a camada neutra (cerca de 50km) que gera o atraso no sinal.

O atraso é determinado a partir do cálculo da refatividade, obtido por medidas de temperatura, pressão e umidade (vapor d'água). Quanto mais essas medidas representem a variabilidade regional e temporal do tempo e clima, melhor será a modelagem do atraso, principalmente sobre a região brasileira, que possui uma vasta extensão territorial e características climáticas específicas. Mas, medidas diretas desses elementos, na extensão de toda a atmosfera, não são possíveis de serem obtidas. Logo, diferentes fontes podem ser aplicadas para quantificar as variáveis atmosféricas, podendo citar: radiossondas, modelos de previsão numérica de tempo e clima (PNT), medidas GNSS e modelos teóricos (ou empíricos).

Nesse sentido, os modelos de PNT são uma boa alternativa em relação à abrangência (resolução espacial) e disponibilização (resolução temporal) das previsões dos constituintes atmosféricos. Esses modelos são compostos por um conjunto de técnicas, funções matemáticas, teorias da atmosfera física e programas computacionais, que disponibilizam análises (valores mais próximos dos medidos) e previsões das variáveis atmosféricas.

Uma técnica aplicada na obtenção do atraso a partir de PNT é o traçado de raio (em inglês, *raytracing*). Essa técnica possibilita descrever o caminho do raio efetivamente percorrido pelo sinal GNSS sob o efeito da atmosfera neutra (HOBIGER et al., 2008 a; HOBIGER et al., 2008 b; NIEVINSKI, 2009). Na técnica de traçado de raio a atmosfera neutra tem uma contribuição nos cálculos do atraso até o limite superior de 75 km, ou seja, há uma sobreposição entre a camada neutra e a ionizada (MENDES, 1999). Mendes (1999) apresenta que até 75km de altitude a contribuição da atmosfera neutra é significativa (reforçando que o termo troposfera para toda essa camada é errôneo), mas nos cálculos do traçado de raio extrapola para 100km. Nievinski (2009) considerando as recomendações de Mendes (1999) adota um meio termo e considera a camada neutra com altitude máxima de 80km.

A partir da técnica de traçado de raio e das variáveis atmosféricas a partir da PNT é possível calcular a refração do sinal e por consequência o atraso que o sinal sofre devido à atmosfera neutra, como também auxiliar no desenvolvimento das funções de mapeamento.

As funções de mapeamento permitem determinar o atraso que afeta o sinal de acordo com o ângulo de elevação do satélite, isto é, na direção inclinada (satélite-receptor). O ângulo de elevação descreve a extensão da atmosfera que o sinal percorreu: quanto menor o ângulo, maior a influência da atmosfera no sinal, o que implica em uma maior magnitude do atraso. Essas funções surgiram da necessidade de determinar o atraso inclinado por meio do atraso zenital – que é único para todos satélites observados e um mesmo receptor.

Para obter melhor qualidade das funções de mapeamento devem ser aplicados modelos de PNT de alta resolução. O Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) tem desenvolvido e aprimorado modelos de PNT e sistemas de assimilação de dados regionais para a América do Sul. Essa melhoria tem apresentado um alto desempenho na previsão de tempo e clima regional (HERDIES *et al.*, 2007). Portanto, modelos regionais de PNT que considerem as variações atmosféricas para cada região do Brasil, e da América do Sul, com alta resolução espacial e temporal, podem resultar em uma função de mapeamento da atmosfera neutra regional de melhor qualidade no posicionamento de alta acurácia, para pós-processamento e em tempo real, o que constitui o objetivo principal dessa pesquisa.

## 1.2 Trabalhos relacionados e potencial contribuição

A determinação do atraso zenital e de funções de mapeamento a partir da PNT tem representado o estado da arte na modelagem do atraso de propagação na atmosfera neutra. Logo, ter uma melhor descrição da atmosfera, como pode ser obtido por modelos de PNT de alta resolução (temporal e espacial), deve levar a uma melhor qualidade do cálculo do atraso e das funções de mapeamento.

A modelagem do atraso zenital com modelos de PNT para o Brasil realizada pelo CPTEC/INPE tem apresentado resultados promissores no posicionamento GNSS sobre essa região (ALVES *et al.*, 2006a, 2006b, 2007a, 2007b, 2015; DALBELO *et al.*, 2006; OLIVEIRA, 2014a e 2014b; ABREU *et al.*, 2014; GOUVEIA *et al.*, 2013, 2014; SETTI JR *et al.*, 2016), em relação aos modelos globais.

Nos últimos anos novos modelos de funções de mapeamento calculadas a partir da PNT vêm sendo desenvolvidos e aprimorados. Dentre as melhorias destacam-se às relacionadas aos modelos atmosféricos e técnicas aplicadas nos cálculos do atraso, sendo: modelos teóricos, modelos de PNT de alta resolução; e a técnica de traçado de raio (NIELL,

1996; BOEHM et al., 2006a; BOEHM et al., 2006b; HOBIGER et al., 2008a; NIEVINSKI, 2009; NIEVINSKI, 2010; SANTOS et al., 2012; LANDSKRON et al., 2018).

Apesar das pesquisas sobre funções de mapeamento estarem consolidadas a nível mundial, no Brasil esse tema ainda não foi investigado. Como apresentado anteriormente, o cálculo do atraso zenital empregando modelos de PNT regional tem apresentado ótimos resultados, porém esses foram associados a funções de mapeamento globais (BOEHM et al., 2006a; BOEHM et al., 2006b;) disponíveis até o momento. Diante do exposto, apresenta-se a originalidade dessa tese, em desenvolver uma função de mapeamento e atraso zenital brasileira com a PNT regional.

As principais contribuições dessa tese são:

- Realização de uma revisão bibliográfica com as principais características da atmosfera neutra, da refratividade e da modelagem do atraso zenital e inclinado. Assim como da técnica de traçado de raio na determinação da função de mapeamento;
- Uso de um modelo de PNT regional de alta resolução espacial e temporal, com a descrição dos dados, assim como das especificidades do modelo;
- Desenvolvimento de uma função de mapeamento a partir do traçado de raio (NIEVINSKI, 2009) com modelo regional de PNT de alta resolução;
- Ampla avaliação (1 ano de dados de quatro regiões do Brasil) do atraso zenital em relação a dados de radiossondas, além de discussões sobre atraso inclinado para o mesmo período;
- Avaliação da qualidade da função de mapeamento desenvolvida nessa tese no posicionamento GNSS.

### 1.3 Objetivos

O objetivo principal dessa tese de doutorado é investigar e desenvolver uma função de mapeamento da atmosfera neutra para a América do Sul com o uso da PNT regional (Função de mapeamento brasileira ou em inglês *Brazilian Mapping Function* - BMF). Os objetivos específicos para atingir tal meta são:

- Investigar o desenvolvimento e implementação de uma função de mapeamento a partir de modelos de PNT e da técnica de traçado de raio;
- Desenvolver uma função de mapeamento que seja mais adequada para a América do Sul, a partir de modelo de PNT regional de alta resolução espacial e temporal, disponível no CPTEC/INPE;



- Realizar avaliação da qualidade da BMF em diferentes regiões brasileiras, com características climáticas distintas, a partir de dados de estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Avaliar a qualidade da BMF por meio do atraso zenital da atmosfera neutra, a partir da radiossondagem;
- Testar e avaliar a qualidade da BMF no método de posicionamento por ponto preciso (PPP), com o software RT\_PPP (MARQUES, 2012);
- Disponibilizar a BMF, em consonância com a resolução do modelo de PNT utilizado, visando à aplicação na Geodésia.

#### 1.4 Estrutura da tese

A tese está estruturada em sete capítulos, sendo que o primeiro é composto pela introdução, hipótese e objetivos da pesquisa realizada. O capítulo 2 apresenta uma breve abordagem teórica sobre os principais conceitos da atmosfera neutra e sua definição, além das especificidades do atraso que o sinal sofre ao ultrapassar essa camada. Os modelos matemáticos e respectivos conceitos que são aplicados na modelagem do atraso de propagação são apresentados no capítulo 3.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia de desenvolvimento da função de mapeamento proposta nessa tese (BMF – *Brazilian Mapping Function*). Os experimentos do atraso são apresentados no capítulo 5, com detalhes da metodologia aplicada a esses experimentos, assim como os seus respectivos resultados e análises.

No capítulo 6 são apresentados os experimentos, resultados e análises da BMF aplicada ao posicionamento de alta acurácia, o PPP. O último capítulo (7) é composto pelas conclusões e recomendações dessa tese.

## 2. ATMOSFERA NEUTRA E SEUS EFEITOS NO POSICIONAMENTO GNSS

### 2.1 Definição da atmosfera neutra: Meteorologia e Geodésia

Os sinais derivados dos satélites GNSS propagam-se do satélite - no espaço - até o receptor - na superfície terrestre ou próximo a essa - através da atmosfera terrestre, que é dinâmica e apresenta características e estados variáveis. Desse modo, os sinais GNSS são influenciados pela composição atmosférica, que provocam: variações na direção da propagação, velocidade de propagação, polarização e potência do sinal.

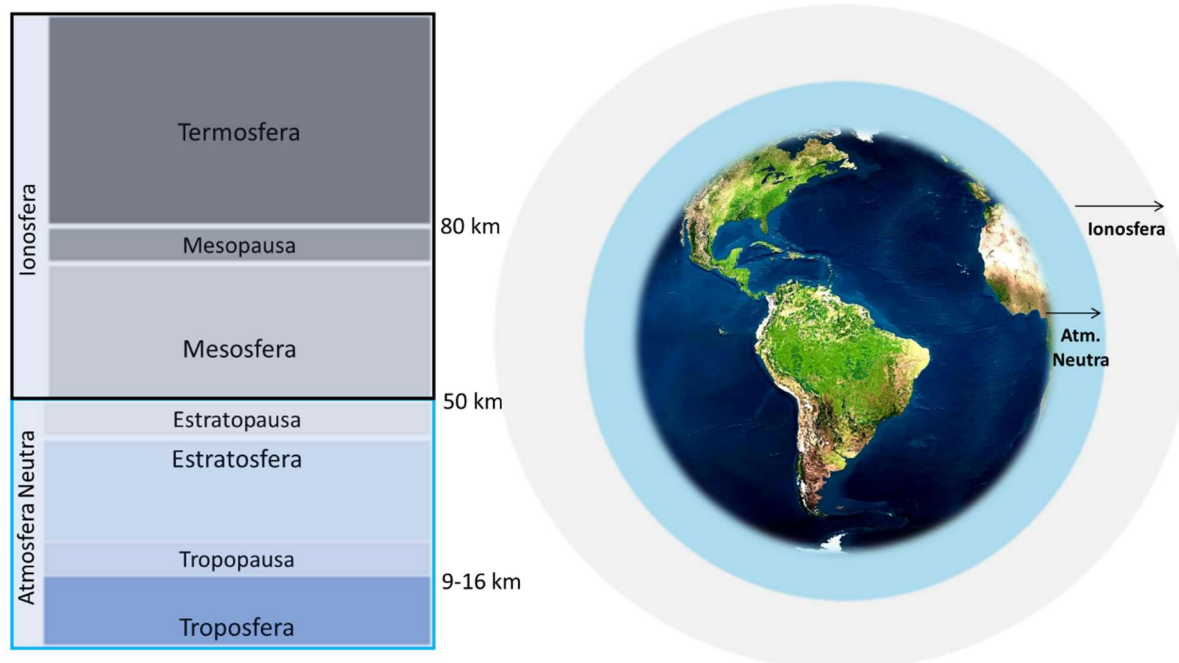
A composição da atmosfera terrestre é uma mistura de partículas sólidas, massas líquidas e elementos gasosos, com diferentes proporções e características próprias. A sua extensão vertical é definida devido à sua massa total, sendo que 90% se encontra nos primeiros 20 km e 99% até 50 km. Acima de 100 km existe cerca de um milionésimo da massa total atmosférica - em todos os casos, tomando como base a superfície terrestre. Sua estrutura é vertical, portanto, variável devido à sua composição (propriedades físicas e químicas) (VIANELLO & ALVES, 2000).

A atmosfera terrestre, de forma simplificada, pode ser caracterizada como um conjunto de camadas teóricas de gases, não homogêneas, esféricas e concêntricas à Terra. Assim, a divisão da atmosfera, quanto à quantidade de camadas, e suas denominações é dependente da área de investigação. A divisão da atmosfera comumente utilizada na Meteorologia é baseada na variação de temperatura (JACOB, 1999; VIANELLO & ALVES, 2000), na qual é composta por quatro camadas teóricas com altitudes e composições variáveis. A termosfera, camada superior, tem altitude de 85-90 km até 1000 km (topo da atmosfera), região ao qual se encontra a ionosfera. A mesosfera é a região onde são observadas as auroras boreais, pois há presença dos íons e partículas livres, com altitude de 50km à 80 km (o vapor d'água e gás carbônico não existem a partir de 60km). A estratosfera tem espessura de aproximadamente 35 km (15 km até 50 km) e nessa região há a absorção da radiação solar pelo ozônio presente na camada (a camada de ozônio). A troposfera é a camada que se encontra em contato com a superfície terrestre, atingindo altitude de até 15-18 km no equador e 6-8km nos polos, essa espessura é variável com as estações do ano. Existem ainda camadas intermediárias com o sufixo "pausa": tropopausa, estratopausa e mesopausa (WALLACE & HOBBS, 2005; VIANELLO & ALVES, 2000; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017).

Na propagação de sinais de radiofrequência (aplicações geodésicas), a atmosfera é dividida considerando a presença ou não de íons. Assim, para fins de propagação, a atmosfera é dividida em duas camadas: camada ionizada e a camada eletricamente neutra. Na camada ionizada existem elétrons livres, já a camada não ionizada é composta por gases hidrostáticos e vapor d'água. A camada ionizada (composta pela termosfera até a mesosfera) é chamada de ionosfera com espessura de 50 km a mais de 1000 km. A camada eletricamente neutra (composta pela troposfera e estratosfera) tem espessura de 50 km a partir da superfície terrestre. Essa camada é denominada de Atmosfera Neutra (50 km até a superfície), também conhecida como troposfera (GGOS, 2019). As ondas eletromagnéticas - que são transmitidas dos satélites GNSS - passam primeiro pela ionosfera, antes de atravessar a atmosfera neutra. Em ambos os meios, os sinais eletromagnéticos são atrasados e refratados (TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017).

A Figura 1 apresenta de forma esquemática as camadas atmosféricas e suas dimensões, tanto em relação à divisão pelo perfil de temperatura, quanto para a presença ou não da ionização.

Figura 1 – Camadas da atmosfera terrestre



Fonte: Figura, à esquerda, adaptada de Teunissen & Montenbruck (2017), à direita Autoria própria (2018).

A ionosfera é composta por gases rarefeitos que combinados com as altas temperaturas (da região da “alta atmosfera”) caracterizam o plasma (outro estado da matéria),

onde há grande concentração de energia. Devido a ação da radiação solar nessa camada há considerável quantidade de átomos e moléculas ionizadas, assim como os elétrons livres (VIANELLO & ALVES, 2000), composição que causa diferentes efeitos nos sinais GNSS (como refração e até perda do sinal). Essa camada é ionizada, ou seja, contém elétrons livres que afetam a propagação do sinal. Tal propagação, por se dar em um meio dispersivo, depende da frequência eletromagnética. A magnitude desse erro é proporcional à densidade de elétrons livres presentes na ionosfera, a qual apresenta variação temporal e espacial. Os efeitos de maior magnitude (99,9% do total) são os efeitos de primeira ordem. Os demais, denominados de ordem superior (segunda e terceira ordem), normalmente são negligenciados pois representam menos de 0,1% do atraso ionosférico. Os efeitos de primeira ordem podem ser eliminados pelo processamento de dupla frequência das observáveis GNSS, a partir da combinação livre da ionosfera (*ion-free*) (CAMARGO, 1999; MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017). Os efeitos de ordem superior, embora representem pouca magnitude do atraso ionosférico total, também precisam ser minimizados para aplicações que requeiram alta precisão (IERS, 2010; MARQUES et al., 2011; MARQUES et al., 2014).

Diferentemente da ionosfera, a atmosfera neutra é um meio não dispersivo para os sinais GNSS, isto é, a refração do sinal que ocorre nela é independente da frequência do sinal transmitido. Pela influência da alta porcentagem do vapor d'água, assim como o aquecimento e resfriamento devido à radiação solar, é nessa camada onde ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos (JACOB, 1999; VIANELLO & ALVES, 2000).

Depois da ionosfera, a atmosfera eletricamente neutra apresenta os maiores erros no posicionamento GNSS, principalmente pela influência dos elementos que compõem a troposfera (SPILKER, 1994). Por essa razão, no que se refere à propagação de sinal, a comunidade geodésica adotou a denominação de troposfera. Seeber (2003) apresenta as divisões da atmosfera terrestre de acordo com a composição e áreas de aplicação, a partir de um esquema simplificado, a saber: temperatura (ciências atmosféricas), a ionização e a propagação (posicionamento), como pode ser observado na Figura 2. Nessa figura é possível verificar que a camada teórica da troposfera - para fins de propagação - não é coerente com a camada de mesmo nome que considera a variação da temperatura aplicada à meteorologia.

Uma vez que as divisões da atmosfera são camadas teóricas, não existem limites físicos que as separam, o que faz com que as camadas interajam trocando propriedades entre si. Isto é, o que acontece na superfície está relacionado com as camadas superiores. Por

essa razão, deve ser destacado que a atmosfera neutra não é a troposfera, embora seja utilizada essa denominação devido à importância da mesma (MENDES, 1999).

Figura 2 – Divisões da atmosfera terrestre de acordo com a área de aplicação

Altitude (km)	Temperatura	Ionização	Propagação
100 000	Termosfera	Protonosfera	Ionosfera
10 000			
1 000			
	Mesosfera	Ionosfera	
100	Estratosfera		
10	Troposfera	Neutrosfera	Troposfera

Fonte: Figura adaptada de Seeber (2003).

A troposfera é a camada em contato com a superfície da Terra e atinge altitude aproximada de 15km a 18km. Essa camada é composta por gases - com maior concentração de: nitrogênio ( $N_2$ ), seguido do oxigênio ( $O_2$ ). Os demais possuem menor proporção, tais como: Argônio (Ar), Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), Neônio (Ne), Hélio (He), Metano ( $CH_4$ ), Criptônio (Kr), Hidrogênio ( $H_2$ ), Óxido nitroso ( $N_2O$ ), Monóxido de carbono (CO), Xenônio (Xe), Ozônio ( $O_3$ ), Dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), Óxido nítrico (NO), Dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), Hidrogênio sulfídrico ( $H_2S$ ), Amônia ( $NH_3$ ), dentre outros - e por vapor d'água ( $H_2O$ ). Os gases hidrostáticos são muito homogêneos e constantes - exceto o  $CO_2$  que possui variação entre dia e noite próximo à superfície - e varia de acordo com a pressão e temperatura. Apesar de baixa concentração do vapor d'água - cerca de 0,25% da massa total da atmosfera - é o componente que apresenta maior variação, espacial e temporal. Sua maior concentração (não é uniforme) ocorre nos quilômetros mais baixos da atmosfera (abaixo de 10km e maior concentração nos 4km iniciais) e em regiões tropicais quentes e úmidas (quase nula nas regiões desérticas e polos), devido ao processo de evaporação da água, dependente da variação da altitude, porém ainda pode ser encontrado em até 60km de altitude (WALLACE & HOBBS, 2005; VIANELLO & ALVES, 2000; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017). Assim, pode-se dizer que a atmosfera neutra úmida tem maior concentração nos primeiros 10km e a seca de 10-15km até sua altitude máxima, cerca de 50km.

Contrário ao vapor d'água, os componentes hidrostáticos apresentam uma distribuição mais uniforme, pois apresentam uma variação da ordem de 1% conforme a pressão

e temperatura local (MONICO, 2008). A atmosfera neutra - principalmente na região da troposfera (0 a 15km) - é uma das camadas mais instáveis devido ao processo de convecção, esse processo resulta em variações dos ventos, vapor d'água e demais variações, o que torna a modelagem da camada neutra mais difícil, principalmente quanto ao vapor d'água (VIANELLO & ALVES, 2000).

## 2.2 Efeitos da atmosfera neutra no posicionamento GNSS

Uma onda eletromagnética é refratada (1ª e 2ª Lei da refração-Lei de Snell) ao se propagar na atmosfera neutra. A refração é a mudança na direção e alteração da velocidade (viaja a uma velocidade menor que a da luz no vácuo) da onda, como é o caso do sinal GNSS. Essa refração é uma variação gradual, que ocorre quando o sinal se propaga entre dois meios de densidades diferentes: a camada atmosférica que contém os gases hidrostáticos e a camada composta por vapor d'água (umidade), distribuídos de forma não homogênea. Os efeitos da refração no sinal GNSS sob a atmosfera neutra são caracterizados como: atenuação, cintilação e o atraso de propagação.

A atenuação é a diminuição da potência do sinal de radiofrequência, variando para cada frequência. A cintilação é a oscilação na amplitude da onda, causada por irregularidades e variações bruscas no índice de refatividade (SPILKER, 1996). Assim, para as frequências do GNSS, esses efeitos são, em geral, relativamente pequenos e podem ser negligenciados, exceto para pequenos ângulos de elevação (menores que 5°) (MONICO, 2008). Isso explica o motivo pelo qual na prática, no processamento de dados GNSS, é utilizado ângulo de elevação do satélite acima de 10° em relação ao receptor que, além desses efeitos, também diminui efeitos de multicaminho, dentre outros; mais detalhes em Monico (2008).

A variação no tempo de propagação do sinal pode ser expressa em medidas de distância, dando origem ao terceiro efeito de maior magnitude, o atraso de propagação na atmosfera neutra, também denominado por atraso troposférico - a partir da discussão na seção 2.1. Nessa Tese, daqui em diante, será utilizada apenas a denominação de atraso, uma vez que o contexto desse é a atmosfera neutra e seu efeito no posicionamento. Pode-se então definir o atraso como uma desaceleração no sinal GNSS na direção satélite-receptor, direção inclinada, que causa um desvio no mesmo (*slant delay*).

Segundo Teunissen e Montenbruck (2017), a atmosfera neutra é considerada um meio não dispersivo, pois tanto para a pseudodistância quanto para a fase (observáveis GNSS), a influência da frequência sobre o efeito da atmosfera neutra é inferior a 0,2 mm, nas

bandas de rádio utilizadas no GNSS, para todos os ângulos de elevação dos satélites. A característica de não dispersão simplifica a modelagem do efeito de propagação sob a atmosfera neutra, já que esses efeitos são idênticos para a pseudodistância e fase da portadora (MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017). No entanto, esses efeitos não podem ser reduzidos por medidas de multifrequência, como no caso da ionosfera, sendo necessária uma modelagem adequada. Assim, pode-se dizer que o atraso é influenciado apenas com relação as variáveis atmosféricas que o origina, como: pressão, temperatura e vapor d'água. As variações desses constituintes atmosféricos ocorrem em relação: à altitude, à sazonalidade (estações do ano), à variação espacial (de acordo com a localização), ao ano-a-ano e à direção ao satélite (elevação e azimute) (SAPUCCI, 2001; VIANELLO & ALVES, 2000; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017; SEEBER, 2003).

A magnitude do atraso varia, além da localização e época do ano - devido à sazonalidade das variáveis atmosféricas - também devido à variação do ângulo de elevação do satélite GNSS em relação ao receptor, que expressa a espessura da atmosfera que o sinal percorreu. Para ângulos próximos ao zênite ( $90^\circ$ ) o atraso total é em torno de 2,5 m. Já próximo ao horizonte ( $5^\circ$ ) o atraso pode atingir mais de 25 m. Assim, esse atraso pode gerar erros dessa magnitude nas coordenadas finais da posição a ser obtida a partir das observáveis dos satélites GNSS, caso o mesmo não seja modelado de forma adequada (TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017; SEEBER, 2003).

### 2.2.1 Composição do atraso de propagação

Devido à composição da atmosfera neutra, o atraso (*neutral atmosphere delay* ou *tropospheric delay*) do sinal GNSS impactado por essa camada pode ser dividido em duas componentes, sendo elas: a componente seca ou hidrostática - composta de gases - chamada de atraso hidrostático (*hydrostatic delay*), e outra composta de vapor d'água, o atraso úmido ou não hidrostático (*wet delay* ou *no hydrostratic*). O termo hidrostático refere-se ao estudo dos fluídos (gases e líquidos) em repouso. Esse termo foi adotado por Davis et al. (1985) ao considerar inapropriado o termo seco, já que essa componente contém uma mistura de umidade do ar. Assim, o termo não-hidrostático torna-se mais coerente, visto que a diferença entre a úmida e a não hidrostática é de 4% (MENDES, 1999). Porém, a partir de Davis (1985) foi adotado - na comunidade científica - o atraso de propagação dividido como: hidrostático e úmido. Nessa tese serão utilizadas as terminologias do atraso nas componentes hidrostática e

não-hidrostática, por serem consideradas mais coerentes, o que será demonstrado no Capítulo 3.

O atraso causado pela componente hidrostática tem a ordem de grandeza de 2,3 m no zênite chegando até dez vezes em ângulos próximos ao horizonte (23 m). A variação dessa componente se dá em relação à temperatura, à altitude, à latitude e à pressão atmosférica. Essa componente representa cerca de 80-90% do atraso total, porém, é determinada com razoável precisão, da ordem de 2% (4 cm na direção zenital), pois sua variação é pequena durante várias horas. A componente não hidrostática representa 10-20% do atraso total (com precisão de 3 a 5 cm no zênite), com magnitude que varia de 30 cm a 2,5m (do zênite ao horizonte) (SEEBER, 2003). Porém, sua variação temporal e espacial é muito maior, cerca de 20% em poucas horas. Essa variação é resultado da variação diária da umidade (quantidade de vapor d'água na atmosfera neutra).

Portanto, a modelagem do atraso hidrostático pode ser obtida com boa precisão e é de fácil modelagem. Já a componente não hidrostática terá melhor qualidade quando as medidas de umidade forem mais próximas dos valores atmosféricos reais, com alta resolução temporal (poucas horas). Com a soma das duas componentes do atraso é possível obter a medida do atraso total, e esse valor deve ser subtraído (além dos demais efeitos e erros) da distância satélites receptor para o cálculo da posição obtida do processamento dos dados GNSS. Podendo assim, obter a posição com melhor qualidade e acurácia (poucos cm) (MONICO et al., 2009).

### 2.3 Fontes de dados para a modelagem do atraso

O atraso do sinal GNSS devido à refração não pode ser medido diretamente, mas ele pode ser expresso a partir de medidas de pressão, temperatura e umidade. Logo, o atraso pode ser modelado a partir de equações matemáticas que considerem essas variáveis atmosféricas – obtidas por diferentes fontes - em conjunto com processos computacionais que permitem a aplicação de dados das variáveis atmosféricas às equações.

A modelagem do atraso é uma estrutura simplificada da realidade com características gerais. Nessa modelagem são consideradas as leis da refração, das ondas eletromagnéticas e da variação do índice de refração, como também simplificações, ao considerar a Terra com representação esférica, além de hipóteses baseadas nas leis do comportamento dos gases, de acordo com temperatura e pressão (SILVA, et al., 1999).



A partir da busca por uma melhor modelagem do atraso – isto é, o valor que seria mais próximo ao que poderia ser obtido por uma medida direta (valor verdadeiro) - diferentes modelos têm sido desenvolvidos. Assim, a modelagem do atraso hidrostático e não hidrostático pode ser obtida por modelos mais simples que fornecem informações médias do comportamento atmosférico (modelos de teóricos), ou por outros mais complexos (maior custo computacional) que geram resultados mais precisos (processamento GNSS, radiossondas, modelos de previsão do tempo etc.). A escolha do modelo a ser utilizado dependerá da acurácia requerida na aplicação.

Uma possibilidade de modelagem é o uso do traçado de raio (raytracing) através de PNT (previsão dos constituintes atmosféricos), uma técnica que tem apresentado importantes resultados na minimização do atraso nas observações GNSS – o que implica em um parâmetro (calculado externamente) a menos para ser estimado no processamento. Essa técnica supõe que o sinal é um raio, e assim são traçados diversos raios ao longo de todo o seu caminho - do satélite ao receptor – "tentando atingir o satélite". Pelo traçado de raio (Seção 3.2) a partir das variáveis atmosféricas, é possível modelar/calcular o atraso, possibilitando descrever o caminho do raio efetivamente percorrido pelo sinal GNSS sob o efeito da atmosfera neutra, como também no desenvolvimento das funções de mapeamento (Seção 3.3). A partir das medidas das variáveis atmosféricas, obtidas por diferentes fontes - radiossondas, modelos de teóricos, modelos de PNT – tem-se os dados de entrada que aplicados à técnica de traçado de raio tornam possível modelar a refratividade e por consequência o atraso de propagação que o sinal sofre devido a atmosfera neutra.

Os modelos de teóricos ou empíricos se baseiam em valores medidos ou previstos de pressão, temperatura e umidade sobre condições atmosféricas médias, obtidos a partir de uma climatologia (considerando longo tempo de dados), distribuídos em uma grade regular global. A climatologia é o estudo do clima (generalização das condições do tempo), ciência que considera a configuração média do comportamento atmosférico ao longo de anos de informações (superior a 10 anos). Essa ciência visa descrever o comportamento normal dos fenômenos atmosféricos (variáveis ao longo do tempo) (VIANELLO & ALVES, 2000).

Desse modo, esses modelos fornecem valores aproximados do atraso e de baixa resolução. Embora representem uma aproximação, seus efeitos são minimizados quando são empregados métodos de ajustamento estimando os resíduos advindos dessa modelagem (SAPUCCI, 2001; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017). Dentre os modelos, pode-se citar: Hopfield (1969); Saastamoinen (1973); Davis et al. (1985); Ifadis (1986); Askne e

Nordius (1987), entre outros. Porém, os modelos mais utilizados são o modelo de Hopfield (SEEBER, 2003) e Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1973 apud HOPFIELD, 1996), os quais apresentam resultados satisfatórios em curtos intervalos de tempo.

Para aplicações em tempo real, como por exemplo, na navegação aérea, principalmente quando resultados altamente acurados (poucos decímetros) são almejados, tais modelos podem não ser apropriados, pois não são capazes de modelar as oscilações do atraso que ocorrem (alta variação de pressão, temperatura e vapor d'água) (SAPUCCI, 2006). Destaca-se que as coletas das observações meteorológicas utilizadas para o desenvolvimento desses modelos foram realizadas, em sua maioria, no hemisfério norte. Por terem poucas estações meteorológicas no hemisfério sul, na época de coleta, foram adotados valores empíricos para todo o globo.

Assim, a maioria dos valores de pressão, temperatura e umidade que são considerados nesses modelos são referentes às características climáticas da região norte. Desse modo, tais valores podem apresentar grandes diferenças em relação aos demais encontrados para essas variáveis na região sul. Cabe destacar que um fator preponderante é o clima tropical desta região, que, como consequência, apresenta bruscas variações de temperatura, pressão e umidade ao longo das estações do ano. Isso ocorre no Brasil, pois devido à forte influência da floresta amazônica, são encontrados no mesmo período do ano, ao longo de um dia, diferentes valores de vapor d'água, de temperatura e de pressão, de acordo com a localidade (ex.: região Norte, Nordeste, Centro-Oeste e região Sul) (GOUVEIA, et al. 2014; ABREU et al., 2014; SETTI et al., 2016; ALVES, et al., 2016). Logo, modelos teóricos geralmente são empregados para realizar correções a priori na estimativa do atraso a partir de processamentos de dados das observáveis GNSS (SAPUCCI, 2001).

A partir do processamento das observáveis do GNSS é possível realizar a estimativa do atraso residual de propagação, com o uso de algoritmos que relacionam o atraso com as observações de pseudodistância e fase da portadora (GREGORIUS, 1996; ROFFATO, 2014). Pode-se também utilizar dados das estações meteorológicas instaladas próximas às estações GNSS. Essas estações são compostas por diversos sensores que medem temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa, velocidade e direção do vento, entre outras variáveis. As informações medidas são registradas automaticamente, com intervalos de coleta similares aos dados GNSS (MONICO, 2006; SAPUCCI, et al., 2010). Essas estratégias são empregadas tanto na modelagem da componente hidrostática quanto da não hidrostática.

A modelagem do atraso a partir de radiossondas e PNT considera além de medidas de superfície, os diferentes níveis da atmosfera. Mais detalhes dessas modelagens serão apresentados nas próximas subseções, pois esses dados são utilizados nesse trabalho.

### 2.3.1 Cálculo do atraso por radiossondas

As radiossondas – também denominadas de estações meteorológicas de altitude - são compostas por um sistema com balões equipados com sensores meteorológicos; antena para posicionamento (como o GPS); e um sistema de rádio transmissor. A partir desse conjunto de equipamentos, as radiossondas coletam medidas meteorológicas in loco, em diferentes níveis da atmosfera (da superfície à altitude máxima do balão), em um determinado local (latitude e longitude), em uma dada época (hora de lançamento do balão) e essas informações são enviadas para estações terrestres por sinal de rádio.

As radiossondas disponibilizam perfis das variáveis atmosféricas para cada estação de lançamento com resolução temporal específica. Os perfis das variáveis atmosféricas fornecem as medidas de pressão (P), temperatura (T), umidade relativa (Umrl), pressão de saturação (Esu) e parcial do vapor d'água (Pw). Essas representam a umidade e os gases hidrostáticos da atmosfera neutra, que são muito variáveis ao longo da atmosfera, em função da localização e do tempo.

Um exemplo da variação da temperatura, da umidade e da pressão – tanto dos gases hidrostáticos (P, T) quanto do vapor d'água (Umrl, Esu, Pw) - em relação à altitude é apresentado na Figura 3, para a estação Manaus-AM no dia 01/01/16. Nessa figura, também é apresentado o atraso em relação às variáveis úmidas (Dw) (perfil da componente úmida do atraso) para cada nível de pressão (média de 90 níveis). Pode-se notar que há uma diminuição expressiva da umidade e da pressão com o aumento da altitude (máximo 25km, nesse exemplo). Já a temperatura é variável, como pode ser visto a partir dos 15km - como discutido na Seção 2.1. Em cada inversão da temperatura há a definição das camadas, sendo a primeira a troposfera, e assim por diante.

Para esse exemplo foi calculada a função de correlação entre as variáveis P, T, U e Dw. Constatou-se que ocorre forte correlação (de 0,9 a 0,7) entre P e T (0,94), seguido de U e P (0,87), Dw e P (0,85), U e T (0,82), Dw e U (0,74) e Dw e T (0,7). A correlação entre altitude (H) e pressão e altitude e Dw, tem forte correlação negativa (enquanto H aumenta, P e Dw diminuem) de -0,95 e -0,7, respectivamente. A partir da Figura 4, e da forte correlação entre

a umidade ( $U_{mrl}$ ) e o atraso úmido ( $D_w$ ) com a temperatura ( $T$ ), é reforçada a divisão da atmosfera em função da temperatura, sendo que para  $T$  negativa a  $D_w$  é praticamente nula.

A parte úmida da atmosfera neutra se estende até cerca de 10-15km, e a parte seca, em todo restante (média de 40 km). Observa-se na Figura 3 que a partir de 15km a umidade é praticamente nula. Porém, deve ser ressaltado que as camadas são divisões teóricas, e interagem entre si, por isso, em cada componente do atraso há influências das variáveis úmida e seca. Por essa razão, a definição da atmosfera neutra, na Seção 2.1, se justifica, pois embora o maior impacto no sinal ocorra nos 15km iniciais (troposfera), para fins de posicionamento o efeito da atmosfera livre de elétrons tem amplitude de 50km (e não apenas 15km).

O cálculo do atraso a partir das radiossondas é determinado por meio das variáveis atmosféricas medidas em diferentes altitudes - para cada estação - aplicadas aos modelos matemáticos. O atraso obtido a partir de dados de radiossondas pode ser considerado como referência quando comparado aos demais modelos. Embora as radiossondas forneçam valores com precisão, é uma técnica de alto custo, o que restringe o número de estações e de lançamentos diários das radiossondas. A maioria dos lançamentos ocorrem a cada 12 horas (00-12 UTC – Tempo Universal Coordenado) (BEVIS et al., 1992), mas há casos de até quatro lançamentos diários (00-06-12-18 UTC). Em Lima (2019) é realizada uma ampla descrição da modelagem do atraso a partir da radiossondagem, além de uma avaliação robusta sobre o território brasileiro.

Figura 3 – Variação da pressão (P), temperatura (T), umidade relativa (Umrl), pressão de saturação (Esu), pressão parcial do vapor d'água (Pw) e atraso úmido vertical (Dw), em relação a altitude para estação de Manaus em 01 de janeiro de 2016.

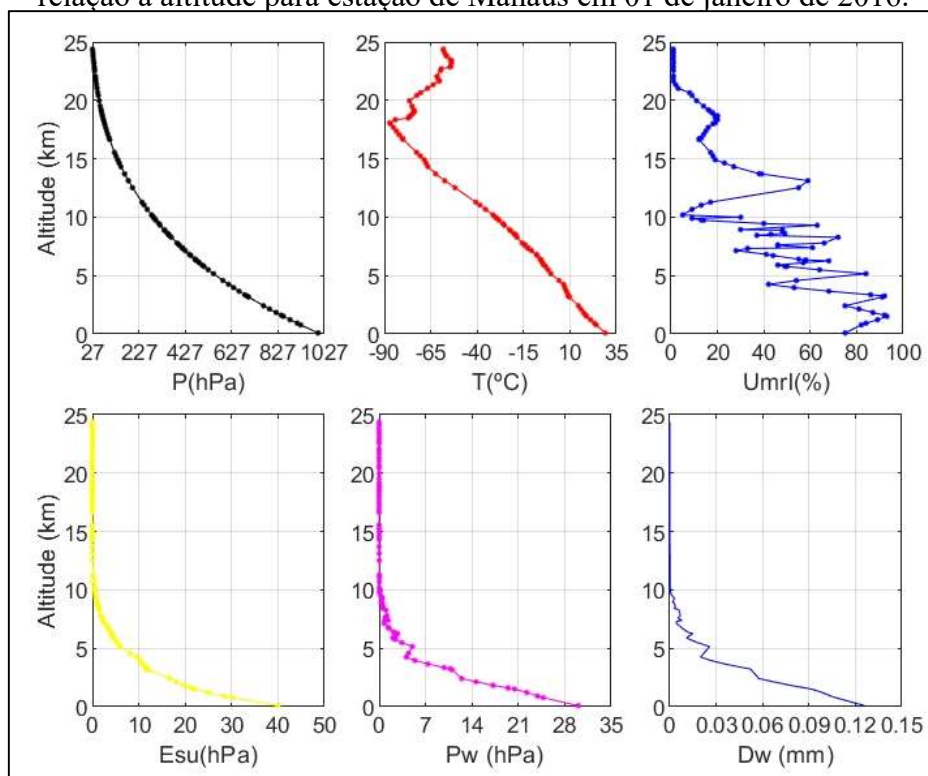
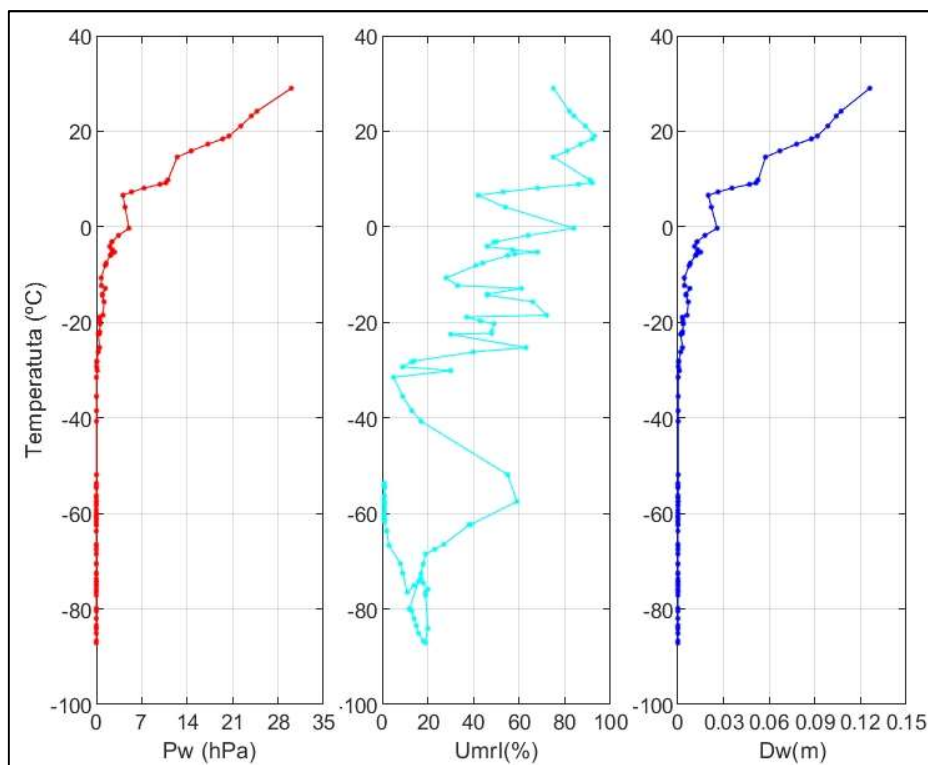


Figura 4 – Variação da pressão parcial do vapor d'água (Pw), da umidade relativa (Umrl), e atraso úmido vertical (Dw), em relação temperatura (T), para estação de Manaus em 01 de janeiro de 2016.



### 2.3.2 Modelagem do atraso a partir de PNT do CPTEC/INPE

A modelagem do atraso a partir da PNT resulta das previsões das medidas de pressão, temperatura, umidade, entre outras. Os modelos de PNT (modelo matemático) consideram um estado inicial da atmosfera, a partir de medidas das variáveis atmosféricas advindas de diferentes fontes (radiossondas, boias oceânicas, navios, etc). Baseados em leis físicas, esses modelos descrevem o comportamento da atmosfera ao longo do tempo, ou seja, esses modelos descrevem o estado da atmosfera no futuro (previsões). Porém, não é uma técnica simples, pois requer modelagem numérica, bem como alto desempenho computacional (supercomputador) para executá-los.

#### 2.3.2.1 Previsão Numérica de Tempo e Assimilação de dados

De forma simplificada, com base no estado inicial da atmosfera por meio de dados observados (medidos), é possível obter o estado futuro da mesma. A melhor qualidade das previsões advém da boa descrição do estado inicial da atmosfera (mais próximo do real), da melhor distribuição das variáveis sobre a região modelada (maior resolução espacial) e do conhecimento das incertezas das variáveis. Nos modelos de PNT é considerada a interação de fenômenos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera, expressos por equações que relacionam as grandezas meteorológicas como a pressão (P), temperatura (T), umidade (U), direção e velocidade do vento, entre outras.

O melhor estado inicial pode ser obtido a partir da assimilação de dados meteorológicos. A assimilação é uma técnica que utiliza toda informação disponível visando descrever adequadamente o estado da atmosfera em um determinado instante como condição inicial para um modelo de PNT. Os dados observados são combinados com as previsões de curto prazo do próprio modelo (“*First Guess*” - FG), gerando assim, condições iniciais (denominadas de análise) para novas integrações (TALAGRAND, 1997 apud GONÇALVES, 1999).

A assimilação pode ser dividida em um ciclo com quatro etapas, com diversos passos para se obter a condição inicial a ser implantada nos modelos de PNT (DALEY, 1991 apud GONÇALVES, 1999), sendo eles: Controle de qualidade - visa encontrar erros nas observações; Análise objetiva - combinação das observações com previsão numérica; Inicialização – em que são reduzidas ou filtradas as energias de alta frequência; Previsão – em

que os campos obtidos na inicialização passam por um modelo numérico que faz previsão de curto prazo (de até 6 horas) gerando campos dinâmicos e consistentes.

Na assimilação de dados sequencial, utilizada na PNT, os modelos são integrados em um intervalo de tempo onde as observações estão distribuídas. Quando o modelo chega a um instante em que existe uma observação disponível, o estado previsto pelo modelo (*background*) é corrigido por essa observação (uma filtragem dos dados). Assim, a integração do modelo é reiniciada após essa correção, e esse processo é repetido para todas as observações disponíveis. Essa operação, onde é realizada a correção de um campo obtido pela integração do modelo com novas observações, é chamada de análise, sendo ela é a representação mais próxima da realidade física da atmosfera (SAPUCCI, et al., 2003; VENDRASCO et al., 2016).

O processo de assimilação de dados em um modelo de PNT é um procedimento cíclico (Figura 5); os resultados gerados pelo modelo de PNT com integração curta no tempo são usados como valores iniciais (FG) pelo sistema de assimilação. Nesse sentido, quanto melhor os dados iniciais, melhores serão os resultados dos modelos de previsão. Assim, resultados de melhor qualidade serão possíveis se os dados iniciais estiverem calibrados, mesmo sob condições de perturbação (mudanças bruscas, como tempestades), além de realizar assimilação para maiores intervalos de tempo, fazendo com que os dados previstos estejam próximos aos reais observados, a cada época (00h, ..., 12h, ..., 24, ...) (SAPUCCI, 2007).

Como as equações que representam a atmosfera (modelos) são solucionadas de forma numérica, é necessário realizar uma discretização da atmosfera, no espaço e tempo. Com essa discretização torna-se possível encontrar a melhor solução das equações em diversos pontos simultaneamente (grade). A solução em cada ponto da grade (horizontal e vertical) e em determinado intervalo de tempo influencia a solução de outras equações, consequentemente das variáveis atmosféricas (P, T, U, etc.).

Quanto maior a resolução horizontal, vertical e temporal, melhor os modelos representarão a realidade da atmosfera e suas variações, uma vez que essas variáveis apresentam forte correlação entre si. Outra questão importante é que quanto mais níveis verticais próximos à troposfera (10km a 12km), melhor a modelagem das variáveis atmosféricas. Isso ocorre pois nessa região da atmosfera existe uma maior concentração e variação dessas variáveis, principalmente do vapor d'água (Figura 3). Nas camadas superiores (acima de 15km) há uma menor variação e concentração de umidade, por essa razão os modelos de PNT consideram uma diminuição no número de camadas à medida que a altitude aumenta (SAPUCCI, et al., 2006).

Figura 5 - Processo de Previsão Numérica de Tempo com Assimilação de Dados



Fonte: Adaptado de SAPUCCI, 2005a.

A discretização espaço-temporal compõe um sistema de derivadas parciais complexo, ou seja, não há solução exata. Logo, a solução desse sistema só é possível por meio de uma aproximação, na qual esforços são empregados para obter a melhor possível. A solução do sistema é obtida a partir de muitos processos numéricos que visam discretizar as equações no espaço e tempo, em células finitas (grade) resultando em um sistema de equações simplificadas, com variáveis finitas, tornando possível solucioná-lo numericamente com o uso de supercomputadores (SAPUCCI, et al., 2006).

Os modelos de PNT variam conforme a área de abrangência (resolução espacial), podendo ser globais ou regionais. Mas, deve-se considerar que os valores das grandezas meteorológicas observados são distribuídos em uma grade irregular de observações. Essa grade, por meio de técnicas de interpolação, é transformada em uma matriz regular e utilizada em softwares para aplicação do modelo, disponibilizados em intervalos de tempo específicos, a cada modelo (resolução temporal).

O tamanho dessa grade é o que define a resolução espacial de cada modelo. Por exemplo, para um modelo de resolução espacial 5 km tem-se que toda a área de abrangência é subdividida em áreas de 5 km x 5 km. Assim, os pontos a serem interpolados estarão em uma área de 5 em 5 km. Portanto, quanto maior a grade, ou a resolução espacial, maior será o detalhamento das previsões sobre a área modelada (maiores números de célula com menores áreas); analogamente, maior resolução temporal implica em um menor intervalo entre as previsões. Dessa maneira, quanto maior a resolução espacial e temporal, maior capacidade computacional de processamento e armazenamento de dados é requerida. Logo, a escolha do melhor modelo, quanto à sua abrangência e resolução, dependerá da aplicação requerida. Exemplificando, se o usuário precisa de previsões para uma área de 50 km, não há necessidade de se ter uma grade de 5 km (SAPUCCI, et al., 2006).



Os modelos globais de PNT são desenvolvidos em diferentes centros mundiais, com o intuito de obter melhor qualidade nas previsões de tempo e clima, podendo destacar os mais utilizados mundialmente: o modelo GFS (*Global Forecast System*) do centro *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) dos EUA e o modelo do centro europeu ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Os modelos regionais visam atender uma demanda local, ou seja, resoluções melhores que dos globais, destacam-se: o modelo Eta, desenvolvido pelo NCEP; o NCAR/UCAR (*National Center for Atmospheric Research of University Corporation for Atmospheric Research*); o BRAMS (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System*) adaptado do RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), desenvolvido nos EUA (Colorado).

No Brasil, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) desenvolve e torna operacional modelos de PNT que consideram as características climáticas da América do Sul. Ao longo dos anos diferentes modelos foram desenvolvidos, visando obter maior resolução temporal e espacial, ou seja um maior detalhamento da atmosfera dessa região. O novo modelo regional adotado pelo centro, denominado *Weather Research and Forecasting* (WRF), além de apresentar maior resolução espacial e temporal, também conta com um sistema de assimilação próprio cujos detalhes serão apresentados na Seção 2.3.2.2.

#### 2.3.2.2 WRF regional

O novo modelo adotado em 2018 como modelo operacional regional pelo CPTEC/INPE é o WRF. Esse modelo representa o estado da arte no que se refere aos sistemas de modelagem atmosférica. Ele é um sistema de previsão meteorológica numérica projetado para aplicações de pesquisa atmosférica e previsão operacional. Esse modelo atende a uma ampla gama de aplicações meteorológicas em escalas de dezenas de metros a milhares de quilômetros. O esforço para desenvolver o WRF começou no final dos anos 90 e foi uma parceria colaborativa do *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (representada pelos NCEP) e o *Forecast Systems Laboratory* (FSL), a *Air Force Weather Agency* (AFWA), do Laboratório de Pesquisa da *University of Oklahoma* e da *Federal Aviation Administration* (FAA) (WRF/NCAR, 2019).

Dentre as características do modelo se destaca que ele é disponibilizado em código de domínio público (código aberto). Comporta quatro diferentes projeções cartográficas: Conforme de Lambert, Polar Estereográfica, Mercator e Projeções de Latitude-Longitude

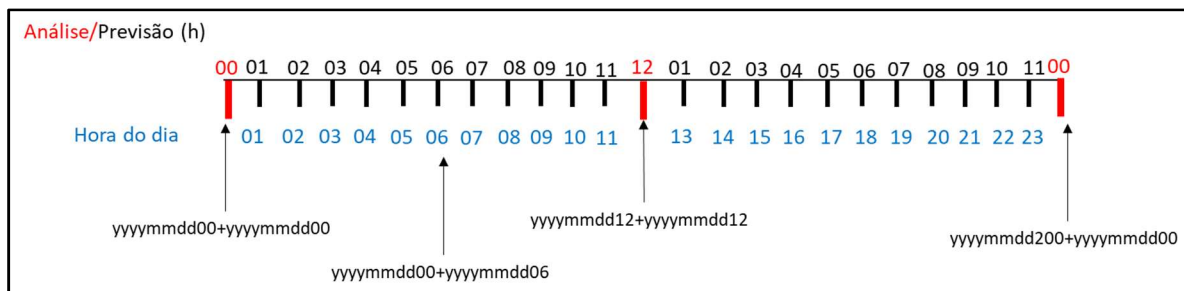
(informação importante quando se utiliza as previsões do modelo na modelagem do atraso), além de possuir um sistema de assimilação de dados, o qual produz condições iniciais do modelo de previsão.

A primeira versão do WRF regional implementada no CPTEC/INPE ocorreu em 2016, visando atender uma demanda de previsões em alta resolução para os Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro. Nesta primeira versão regional, o WRF foi implementado na resolução de 9 km sobre a América do Sul. Essa tarefa foi realizada conjuntamente com o sistema de assimilação *Weather Research and Forecasting model Data Assimilation* (WRFDA), um sistema com maior desenvolvimento em assimilação de dados de radar que representa os avanços recentes nesta área. A aplicação desse sistema vem ao encontro da demanda dos centros regionais (como o CPTEC) de obter previsões de altíssima resolução com ciclo rápido de assimilação de dados, tendo por objetivo principal a ampliação do desempenho das previsões de eventos extremos (VENDRASCO et al., 2016), que são recorrentes no Brasil. A magnitude, a localização e a ocorrência, desses eventos podem ser distintas, devido a extensão e o clima tropical brasileiro, o que exige ainda mais qualidade das previsões regionais.

A nova versão do WRF para a América do Sul se tornou operacional no CPTEC/INPE em 01 de agosto de 2018. Como anunciou o Centro, a adoção do modelo regional WRF tem por objetivo gerar previsões regionais de tempo mais acuradas, em consonância com a modernização da previsão numérica de tempo no Brasil “em proveito do bem público e dos usuários” (CPTEC, 2018).

A nova versão operacional das previsões do WRF regional tem resolução horizontal de 5 km (0,045°), vertical de 25 níveis e temporal de 1h (previsão de até 72 horas) as quais são obtidas a partir de duas análises diárias (00h e 12h UTC). A partir da Figura 6 é possível verificar que de acordo com as horas do dia (24h), tem-se duas análises (em vermelho) e as suas previsões - nesse exemplo de 01h - 11h, ou seja, às 12h (do dia) já terá uma nova análise disponível, com mais 11h de previsões. Cada arquivo do WRF contém em seu nome as informações da época a que se refere, assim como da análise e da previsão a partir das quais foi gerado. Esse novo produto é disponibilizado em [http://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/tempo/WRF/ams\\_05km/brutos](http://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/tempo/WRF/ams_05km/brutos). As variáveis atmosféricas a partir do WRF são apresentadas em gráficos por região e dia em <http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/novo/meteograma/wrf/mt/>. Detalhes adicionais do modelo WRF utilizado nessa tese serão apresentados no Seção 4.1.1.

Figura 6 – Linha do tempo em relação a análise, previsões e hora do dia



### 2.3.3 Vantagens e desvantagens das fontes de dados

Após apresentadas as fontes de dados para o uso na modelagem do atraso, torna-se possível caracterizar as diferentes vantagens e desvantagens de cada uma delas:

- Os modelos de teóricos representam uma atmosfera padrão (médias de anos de dados), valores esses que são válidos para sua abrangência espacial e por tempo indeterminado. Embora não sejam capazes de expressar a variabilidade da atmosfera e assim apresentar baixa qualidade, podem ser utilizados na ausência de outras fontes de dados;
- O cálculo do atraso a partir de observáveis GNSS fornece as variáveis do atraso modeladas por estimação no processamento dos dados, com alta resolução temporal e espacial (disponível 24h em todo globo) e apresenta boa precisão (ROFFATO, 2014; MARQUES, 2012);
- As radiossondas disponibilizam perfis verticais das variáveis medidas (in loco), por isso representam a referência de qualidade da representação atmosférica e por consequência do atraso, porém apresentam alto custo e baixa resolução (temporal e espacial);
- Os modelos de PNT, como os regionais, têm alta resolução espacial, vertical e temporal, além de serem disponibilizados gratuitamente. Uma desvantagem que pode ser citada é que as melhores representações da atmosfera, a análise, tem baixa resolução temporal e as demais medidas são obtidas por previsão. Assim, a eficiência da modelagem do atraso de propagação dependerá da qualidade das previsões do modelo de PNT.

Nesse cenário, os modelos de PNT regionais de alta resolução do CPTEC podem ser considerados como melhores opções para o Brasil e América do Sul, uma vez que, a partir da previsão do tempo realizada no CPTEC, é possível obter a modelagem do atraso com valores mais próximos da realidade dessa região.

### 3. MODELOS MATEMÁTICOS ENVOLVIDOS NO CÁLCULO DO ATRASO E NO POSICIONAMENTO GNSS

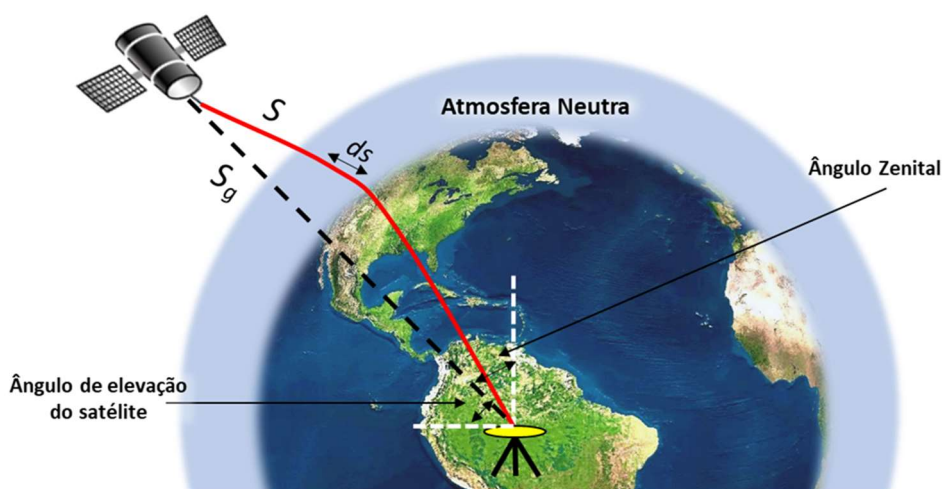
#### 3.1 Refração da atmosfera neutra e o atraso de propagação

##### 3.1.1 Modelagem da refratividade

A refração é um fenômeno em que uma onda eletromagnética (luz; sinal GNSS) é transmitida de um meio para outro diferente (SMART, 1977). O que ocorre é que nessa transmissão há uma alteração na velocidade e comprimento da onda. Esse fenômeno pode ser explicado pela 2ª lei de refração – ou Lei de Snell. No sinal GNSS, a refração é a mudança de direção e alteração da velocidade do sinal ao se propagar entre meios de densidades diferentes, sendo esses os gases hidrostáticos e o vapor d'água que compõem a atmosfera neutra.

A variação do índice de refração causa na trajetória do sinal, entre o satélite e o receptor, uma leve curvatura quando comparada à trajetória geométrica no vácuo. Para realizar medidas do efeito da atmosfera neutra sobre essa trajetória são aplicados os conceitos de geometria matemática na interpretação da forma e dimensões da Terra, assim como da atmosfera. Na Figura 7 é apresentada de forma ilustrativa e geométrica o atraso, que é calculado pela diferença entre a trajetória efetiva percorrida pelo sinal (traço contínuo) – sob o efeito da atmosfera neutra – e a distância geométrica (traço intermitente) percorrida pelo sinal no vácuo (SAPUCCI, 2001).

Figura 7 - Efeito da atmosfera neutra nos sinais GNSS.



Fonte: Adaptada de SAPUCCI (2001).

O índice de refração é o valor com o qual é medida a capacidade de um meio causar mudanças na direção e alteração da velocidade de uma onda eletromagnética, que por ele se propaga. Em outras palavras, o índice de refração ( $n$ ) é a razão entre as velocidades da onda no vácuo ( $c$ ) e sua velocidade em um meio qualquer ( $v$ ) ( $n = c/v$ ). Considerando a parte infinitesimal ( $ds$ ) do comprimento da trajetória realizada pelo sinal GNSS, devido ao efeito causado pela atmosfera neutra, ocorre um atraso de tempo ( $dt$ ), considerando uma velocidade média instantânea ( $v = ds/dt$ ) do sinal GNSS. Esse atraso de tempo ( $dt = nds/c$ ) também pode ser expresso por medida de distância e pelo índice de refração ( $cdt = nds$ ) (SMART, 1977).

O índice de refração tem valores muito próximos à unidade (por exemplo:  $n_{\text{ar seco}}=1,000292$  e  $n_{\text{água}}= 1,333$ ) e por essa razão é importante expressá-lo por meio de outra grandeza, que é denominada refratividade do ar ( $N$ ),  $N = (n - 1)10^6$ .

A refratividade pode ser dividida em duas componentes: a componente hidrostática (*dry*)  $N_d$  e a componente úmida  $N_w$  (*wet*). Essa separação ocorre devido ao comportamento diferenciado dos gases hidrostáticos e do vapor d'água - presentes na atmosfera neutra, e principalmente na troposfera. Logo, a refratividade atmosférica é dada pela Equação (1) (THAYER, 1974; ESSEN & FROOME, 1951 apud TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017)

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{P_w}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{P_w}{T^2} Z_w^{-1} = N_d + N_w. \quad (1)$$

A componente  $N_d$ , primeiro termo da Equação (1), é ocasionado pelos gases da atmosfera neutra:  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ ,  $CO_2$ ,  $Ne$ ,  $He$ ,  $Kr$ ,  $Xe$ . Todos esses elementos são tratados em único elemento da Equação (1) pois a razão da mistura desses gases é praticamente constante (DAVIS, et al., 1985). Assim, a componente seca da refratividade será composta pela pressão dos gases hidrostáticos ( $P_d$ ) em hPa, a temperatura ( $T$ ) em *Kelvin*, o inverso da constante de compressibilidade da componente seca ( $Z_d^{-1}$  – Equação (3)) e a constante  $k_1$  (77,689 K/hPa) definida empiricamente.

A componente  $N_w$ , segundo e terceiros termos da Equação (1), é ocasionada pelo vapor d'água. Logo, sua composição se dá pela pressão do vapor d'água ( $P_w$ ), pelo inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água ( $Z_w^{-1}$  – Equação (4)) e por constantes empíricas,  $k_2$  (71,2952 K/hPa) e  $k_3$  (375463 K<sup>2</sup>/hPa) (RUEGER, 2002).

Os fatores de compressibilidade na Equação (1) são valores empíricos de correção da equação de gás ideal, ou seja, indicam a magnitude da não idealidade de um gás. Esses fatores foram inseridos na equação de gases ideais ( $PV = nRT$ ) como uma correção para que essa possa ser aplicada a gases reais - como aos gases hidrostáticos ( $Z_d$ ) e vapor d'água ( $Z_w$ ). Assim, à equação dos gases ideais foi adicionado o fator de correção da compressibilidade.

A nova equação dos gases corrigida pela compressibilidade será determinada a partir: do volume de um gás ( $V_i$ ) à mesma temperatura ( $T$ ) e pressão ( $P$ ), em relação à constante de gás universal; do número de mol ( $n_i$ ); da constante específica de um gás ( $R_i$ ), razão entre a massa molar ( $M_i$ ) e massa ( $m_i$ ) de um gás; da densidade do ar ( $\rho$ ). Assim, a compressibilidade – considerando:  $n_i = \frac{m_i}{M_i}$ ;  $R_i = \frac{R}{M_i}$ ;  $\rho_i = \frac{M_i}{V_i}$  - pode ser obtida por:

$$PV_i = n_i RT Z_i \rightarrow Z_i = \frac{PV_i}{n_i RT} = \frac{M_i P V_i}{m_i R T} = \frac{P}{R_i \rho_i T}, \quad (2)$$

Para um gás ideal,  $Z_i$  é igual à unidade, para gases não ideais ele é muito próximo a esse valor. A partir de medidas empíricas e tratamentos algébricos adequados, e ainda considerando  $T_c$  (°C) e  $T$  (K) tem-se o inverso do fator de compressibilidade para os gases hidrostáticos ( $Z_d^{-1}$ ) e o vapor d'água ( $Z_w^{-1}$ ), respectivamente (THAYER, 1974; DAVIS et al, 1985):

$$Z_d^{-1} = 1 + p_d \left[ 57,97 \cdot 10^{-8} \left( 1 + \frac{0,52}{T} \right) - 9,4611 \cdot 10^{-4} \frac{T_c}{T^2} \right], \quad (3)$$

$$Z_w^{-1} = 1 + 1650 \frac{p_w}{T^3} \left[ 1 - 0,01317 T_c + 1,75 \cdot 10^{-4} T_c^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} T_c^3 \right]. \quad (4)$$

A relação da refratividade do ar com a altitude ( $h$ ) é dependente da mistura das componentes seca e úmida (altamente variável). No entanto, é possível tornar parte da Equação (1) independente da razão de mistura, após tratamento algébrico e ao considerar as características físicas dessa componente (SAPUCCI, 2001). Isso pode ser obtido ao reescrever os dois primeiros termos da Equação (1), considerando os fatores inversos da compressibilidade apresentados pelas Equações (3) e (4). Logo, a refratividade atmosférica, a partir da refratividade hidrostática ( $N_h$ ) e da não hidrostática ( $N_{nh}$ ), é dada por (THAYER, 1974; DAVIS et al., 1985; SAPUCCI, 2001; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017):

$$N = k_1 R_h \rho + k'_2 \frac{P_w}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{P_w}{T^2} Z_w^{-1} = N_h + N_{nh}. \quad (5)$$

Sendo assim, a componente  $N_h$  será dada por:  $k_1$ , densidade do ar atmosférico ( $\rho = \rho_h + \rho_w$ ); e pela razão entre a constante específica dos gases hidrostáticos ( $R_h = 287,0538 \pm 0,0184 \frac{J}{kg K}$ ). Já a componente  $N_{nh}$  é acrescida de uma nova constante,  $k'_2$ . Essa constante pode ser obtida a partir da Equação (6) (SAPUCCI, 2001), considerando que  $R_i \rho_i = \frac{P}{TZ_i}$ , sendo (DAVIS et al., 1985; RUEGER, 2002):

$$k'_2 = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_w} = k_2 - k_1 \frac{R}{M_d} \frac{M_w}{R} = k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} = 71,2952 - (77,6890 \times \frac{18,0152}{28,9644}) = 22,9744, \quad (6)$$

em que as constantes  $M_d$  e  $M_w$  representam a massa molar dos gases hidrostáticos e do vapor d'água, respectivamente. O primeiro termo da Equação (5), que se refere à componente hidrostática, agora depende apenas da densidade total da atmosfera e não da razão de mistura das componentes hidrostática e não hidrostática. Por outro lado, a componente não hidrostática (demais termos da Equação (5)) está relacionada com a temperatura e pressão do vapor d'água (MENDES, 1999).

### 3.1.2 Modelagem do atraso a partir da refatividade

A trajetória do sinal GNSS entre dois pontos será aquela percorrida no menor intervalo de tempo (Princípio de Pierre de Fermat). Logo, considerando a atmosfera com diferentes camadas, o caminho percorrido pelo sinal do satélite (real) é curvado e único, definido por um índice de refração total, dado pelo somatório da menor distância nas camadas. Em outras palavras, o comprimento da trajetória efetivamente percorrida pelo sinal - do satélite GNSS até o receptor - pode ser obtida pelo índice de refração ( $n$ ) em função da: distância radial ( $r$ ); da colatitude ( $\theta$ ) - complementar a latitude ( $90 - \varphi$ ),  $0 \leq \theta \leq \pi$ ; da longitude ( $\lambda$ ) -  $0 \leq \lambda \leq 2\pi$ ; e do comprimento do arco ao longo do raio ( $s$ ). Determinada a posição de um ponto ao longo do caminho do raio é possível calcular  $n$  e o comprimento do raio ( $d$ ) (NIEVINSK, 2009; NAFISI, 2012):

$$d = \int n(r, \theta, \lambda) ds, \quad (7)$$

Quando a refatividade for maior que um ( $n > 1$ ), as ondas eletromagnéticas se propagam mais devagar que no vácuo, ou seja, sofrem um atraso. Já a refração contínua faz com que o caminho do raio seja curvado de acordo com o princípio de Fermat, como é representado na figura 7.

Pode-se dizer que o atraso total será a diferença entre o comprimento do raio ( $S$ ) e a distância geométrica, em linha reta ( $Sg$ ). Assim, considerando os efeitos devido à refração da atmosfera neutra (Seção 3.1), o atraso total ( $d$ ) será determinado ao considerar a Equação (7) com tratamento algébrico adequado:

$$d = \int n(r, \theta, \lambda) ds - Sg = \int [n(r, \theta, \lambda) - 1] ds + (\int ds - Sg). \quad (8)$$

Sendo assim, a partir do conceito de refratividade ( $N = (n - 1)10^6$ ) o atraso ( $d$ ) será a diferença entre a distância efetivamente percorrida pelo sinal ( $S$ ) e a distância geométrica ( $Sg$ ), como é representado na Figura 7. A modelagem do atraso a partir das Equações (7) e (8) será expressa pela Equação (9) (SILVA, *et al.*, 1999; SAPUCCI, 2001; NIEVINSKI, 2009; NAFISI, 2012):

$$d = 10^{-6} \int N(r, \theta, \lambda) ds + (\int ds - Sg). \quad (9)$$

O primeiro termo da Equação (9) ( $S$ ) expressa o atraso ao longo do sinal, o segundo termo ( $dg$ ) é o atraso geométrico – o que deixa claro que o efeito de curvatura ( $\int ds$ ) é diferente da distância geométrica ( $Sg$ ), uma vez que o caminho do raio é modelado sob o caminho curvo.

A camada neutra da atmosfera não é um meio homogêneo, sendo assim o índice de refração tem variação pontual. Assim,  $ds$  é a distância infinitesimal ao longo do caminho do raio verdadeiro. Logo, o atraso inclinado total será a soma do caminho do raio percorrido, entre satélite transmissor ( $^t$ ) e receptor ( $^r$ ), e o atraso geométrico ( $dg$ ), dado por:

$$d = 10^{-6} \int_r^t N ds + \Delta dg = 10^{-6} \int_r^t N_h ds + 10^{-6} \int_r^t N_{nh} ds + \Delta dg. \quad (10)$$

Portanto, o atraso total é composto por três componentes: primeiro é o atraso hidrostático ( $d_h$ ), segundo o atraso não hidrostático ( $d_{nh}$ ), e o terceiro é o efeito de curvatura ( $\Delta dg$ ), que faz com que o sinal percorra um caminho mais longo, ainda que mais rápido, que o caminho do raio em linha reta (TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017; SAPUCCI, 2001; NIEVINSKI, 2009).

Os sinais GNSS são transmitidos aos receptores em qualquer direção caracterizada pelo ângulo de elevação e azimute. Por isso é necessário conhecer os componentes hidrostáticos e não hidrostáticos dessas direções. O caminho do raio real é único e definido por um índice de refração total. Ou seja, o atraso na direção inclinada (satélite-receptor) é obtido



em função do tempo, das coordenadas do receptor ( $\varphi, \lambda, h$  - latitude, longitude e altitude) e da direção do satélite ( $\varepsilon, \alpha$  - ângulo de elevação e azimute):  $d_{h,nh} \equiv d_{h,nh}(t, \varphi, \lambda, h, \varepsilon, \alpha)$ . O atraso na direção zenital (vertical) é um caso específico do atraso (cujo ângulo de elevação é o zênite), isto é:  $d_{h,nh}^z \equiv d_{h,nh}(t, \varphi, \lambda, h, \varepsilon = 90^\circ)$ . Na direção zenital o fator  $dg$  é nulo (NIEVINSKI, 2009).

No atraso zenital, a integração da refratividade é definida em relação à altitude, isto é, do perfil vertical de gases hidrostáticos e do vapor d'água sobre um local (estação) (TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017; SAPUCCI, 2001). Assim, o atraso hidrostático, na direção zenital (Equações (5) e (10)), irá variar em relação à altitude mínima – de superfície ( $h_0$ ), e a máxima – altitude máxima da atmosfera neutra ( $h$ ):

$$d_h^z = 10^{-6} \int_{h_0}^h N_h ds = 10^{-6} \int_{h_0}^h k_1 R_h \rho dh. \quad (11)$$

A componente hidrostática do atraso zenital depende apenas da densidade total do ar ( $\rho$ ), isto é, possível de ser determinada com razoável precisão. Isso ocorre, pois a pressão de superfície ( $P_0$ ) apresenta pouca variação em horas e quilômetros de distância, e os outros termos -  $k_1 e R_h$  - são constantes. Assim, considerando o equilíbrio hidrostático é possível determinar a densidade do ar (ASKNE & NORDIUS, 1987):

$$\frac{dP}{dh} = -\rho(h) g(h) \Rightarrow P_0 = \int_{h_0}^{h_\infty} \rho(h) g(h) dh. \quad (12)$$

Em que  $g(h)$  é a aceleração da gravidade na altitude  $h$ ;  $P$  a pressão do ar; e  $\rho(h)$  a densidade do mesmo. Resolvendo a integral da equação (12) pode ser determinada a  $P_0$ . A aceleração da gravidade média ( $gm$ ) representativa para uma atmosfera com variação de densidade é (SPILKER, 1994):

$$gm = \frac{\int_{h_0}^{h_\infty} \rho(h) g(h) dh}{\int_{h_0}^{h_\infty} \rho(h) dh} \Rightarrow gm = \int_{h_0}^{h_\infty} \rho(h) dh. \quad (13)$$

Das Equações (12) e (13), tem-se:

$$P_0 = gm \int_{h_0}^{h_\infty} \rho(h) dh \Rightarrow \int_{h_0}^{h_\infty} \rho(h) dh = \frac{P_0}{gm}. \quad (14)$$

O parâmetro  $gm$  é definido em função da latitude ( $\varphi$ ) e altitude inicial ( $h_0$ ), sendo (SPILKER, 1994):

$$gm = f(\varphi, h_0) = 9,784(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028 h_0). \quad (15)$$

Portanto, por meio das Equações (11), (14) e (15) é possível determinar o atraso zenital hidrostático:

$$d_h^Z = (2,27683157 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-7}) \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028 h_0)}, \quad (16)$$

A componente não-hidrostática está relacionada com a razão de mistura entre os gases hidrostáticos e o vapor d'água (DAVIS et al. 1985) a partir das medidas que não podem ser realizadas na superfície, sendo necessário utilizar outros métodos. O atraso úmido é obtido a partir da Equação (17), não sendo possível fazer reduções como na componente hidrostática. Isso ocorre, pois a pressão parcial do vapor d'água ( $P_w$ ) é muito variável com relação ao espaço e ao tempo. Assim, a solução exata da Equação (17) se torna complexa, fazendo com que o atraso zenital úmido ( $d_{nh}^Z$ ) seja de difícil predição.

$$d_{nh}^Z = 10^{-6} \int_{h_0}^h N_{nh} ds = 10^{-6} \int_{h_0}^h \left( k'_2 \frac{P_w}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{P_w}{T^2} Z_w^{-1} \right) dh. \quad (17)$$

Considerando as Equações (10) e (17), o atraso na direção satélite-receptor (inclinada) ( $d$ ) é obtido a partir do atraso na direção zenital e a aplicação de funções de mapeamento. Com essas funções é possível calcular o atraso de acordo com a espessura da atmosfera neutra que o sinal percorreu (Seção 3.3).

### 3.2 Traçado de raio (*ray tracing*)

Segundo a Sociedade Americana de Meteorologia (AMS, 2019) a técnica de traçado de raio é uma aproximação gráfica ou matemática utilizada para determinar a propagação de ondas eletromagnéticas ou sonoras, seguindo o caminho dos raios, o qual obedece às leis de reflexão e refração. Assim, o sinal de radiofrequência, como o sinal GNSS, pode ser representado por meio de um raio. O caminho percorrido por esse sinal (satélite ao receptor) pode ser modelado ao ir traçando esse raio ao longo de todo o caminho desse sinal, ou seja, a partir de um somatório de raios traçados. Esse procedimento é denominado traçado de raio, ou *ray tracing* (NIEVINSKI, 2009).

Os avanços na PNT (aumento da resolução espacial e temporal), na assimilação de dados e na precisão desses, têm proporcionado melhores resultados advindos da modelagem do atraso por traçado de raio. Outra fonte de dados que tem contribuído nessa área de estudo são os modelos de reanálise (climatologia de anos de dados) que proporcionam cálculo do atraso a partir de dados PNT históricos (retroativos), como por exemplo, dados geodésicos arquivados. A técnica de traçado de raio, com o uso da PNT - cada vez com melhor resolução – é o método mais rigoroso na determinação do atraso total (NAFISI, 2012; NIEVINSK, 2010).

Na busca do desenvolvimento de melhores modelos de traçado de raio foram desenvolvidas diversas metodologias, tais como: Spencer et al. (1962); Stam et al. (1996); Hase et al. (1999); Mendes (1999); van der Werf (2003); Boehm (2003; 2006); Seron et al. (2005); Hobiger et al. (2008a); Hobiger et al. (2008b); Hullery et al. (2007); Nievinsk (2009); Nievinsk et al. (2010). Em uma análise desses trabalhos pode-se observar que essa técnica não é recente, porém diferentes pesquisas foram desenvolvidas buscando obter valores mais acurados de acordo com o modelo utilizado e principalmente pelos dados de entrada aplicados. Nafisi et al. (2012) realizaram uma comparação entre diferentes modelos de traçado de raio, apresentando a qualidade das mesmas assim como as possíveis melhorias.

### 3.2.1 Traçado de raio aplicado para o cálculo do atraso

A técnica de traçado de raio aplicada à atmosfera neutra visa descrever o caminho percorrido pelo sinal GNSS sobre o efeito das variáveis dessa camada - pressão, temperatura, vapor d'água, entre outros. No traçado de raio a espessura da atmosfera neutra se estende da superfície até 100 km, ou seja, há uma superposição entre as camadas neutra e ionizada. Como abordado na seção 2.1 as divisões das camadas são teóricas, e por isso, mesmo que bem pequena (quantidade infinitesimal) há uma interferência do vapor d'água além de 50 km (NIEVINSKI, 2009; MENDES, 1999). No traçado de raio, considera a suposição geral de que a atmosfera é homogênea (não necessariamente nula) dentro da escala da zona de Fresnel (NIEVINSKI, 2009). O método de traçado de raio compõe um sistema formado por: dados de entrada (*inputs*), a própria técnica (*ray tracing*) e os dados de saída (*outputs*), que são os resultados da técnica. Essas etapas são (NIEVINSKI, 2009; NIEVINSKI et al., 2010):

- Os **dados de entrada** da técnica são: os constituintes atmosféricos - o ângulo de elevação inicial, valores de altitude, temperatura e pressão do vapor d'água, considerando diferentes níveis de pressão, os quais podem ser obtidos a partir de modelos de teóricos, medidas de

radiossondas ou a partir de modelos de PNT; como também, as coordenadas da estação e o ângulo de elevação;

- A **técnica** será melhor detalhada a seguir;
- A **saída**, ou resultados, são: medidas dos constituintes atmosféricos para cada ponto que compõe o caminho do raio; o ângulo de elevação final (*outgoing elevation angle*); e o próprio caminho percorrido pelo sinal GNSS.

Segundo Nievinski (2009), a **técnica do traçado de raio** pode apresentar três características principais: o modelo do caminho do raio; a estrutura atmosférica; e a fonte atmosférica selecionada. O **modelo do caminho do raio**, ou modelo de trajetória do raio, apresenta três principais estruturas – zenital (ou linha reta), curva 2D (curva plana) e curva 3D. Cada um dos modelos apresentam variação em relação à forma, escala, posição e orientação.

No modelo zenital ou de linha reta, a refratividade homogênea tem vantagens em relação aos demais - já que a distância em linha reta é igual à distância no vácuo (desconsidera a curvatura do raio) - podendo ser conhecida antecipadamente, além da representação ser muito satisfatória para ângulos zenitais até 30°. Também deve-se considerar que as variações são desprezíveis na direção perpendicular à tangente do raio. Esse método é diferente dos demais modelos que requerem a modelagem do caminho curvo (devido ao efeito da atmosfera neutra), que precisará ser determinado de forma iterativa a partir do traçado de raio.

O caminho do raio é próximo a uma curva plana (2D). Sabe-se que a componente horizontal (azimute - Az) apresenta valores muito pequenos em relação à componente vertical. Sendo que a representação plana do caminho do raio pode representar, na maioria dos casos, o efeito de curvatura do sinal. A modelagem do atraso na direção zenital é um caso específico dos modelos de linha reta e de curva plana, o que ocorre quando a direção do raio coincide com a direção vertical.

O modelo do caminho do raio 3D considera a mudança de posição na componente perpendicular ao plano de incidência, ou seja, a posição real depende do meio de propagação e de um conjunto de condições. Podem ser pré-determinadas condições como posição e direção inicial. Esse modelo é considerado um caso geral dos modelos de trajetória do raio, na verdade os demais são simplificações desse (NIEVINSKI, 2009). Nievinski et al. (2010) apresentam que o modelo 2D - embora não estritamente válido em um ambiente 3D - apresenta erros insignificantes em condições típicas, em comparação com o mais rigoroso modelo 3D (em um modelo de PNT de resolução horizontal de 15 km).

A **estrutura atmosférica** é considerada com cinco principais divisões – esférica concêntrica, esférica osculante, elipsoidal, gradiente e 3D. As quatro primeiras estruturas são baseadas em perfis, ou seja, os dados são armazenados em um único perfil vertical - o mesmo para qualquer posição horizontal. Isto é, a variação vertical ( $f(h)$ ) é modelada e a horizontal negligenciada, o que pode ser considerada uma boa aproximação da atmosfera. As diferenças dessas estruturas são basicamente: a esférica é concêntrica ao centro de massa da Terra; a esférica osculante (centrada fora do centro de massa da Terra) tem a direção vertical coincidente com a direção radial de uma esfera centrada no centro de curvatura do elipsoide, ou seja, que tangencie o elipsoide em um determinado ponto de base; a estrutura atmosférica elipsoidal toma a direção vertical como a normal ao elipsoide; o gradiente é baseado em duplo perfil: um de condições atmosféricas médias (mesmo caso da elipsoidal), e outro de perfil de gradiente horizontal dos constituintes atmosféricos – para cada altitude ( $f(h, Az)$ ); e a 3D é o caso mais geral, do qual não se faz suposições sob a variação dos constituintes atmosféricos ou das direções vertical ou horizontal, ou seja, a fonte atmosférica é representada mais próxima de sua estrutura real ( $f(h, Az, D)$ ).

A **fonte atmosférica** pode ser representada por três estruturas principais – modelos teóricos, radiossondas e modelo de PNT. A Tabela 1 apresenta de forma esquemática as características do traçado de raio, da estrutura atmosférica e do modelo do caminho do raio na determinação do traçado de raio. O raio vertical se dá em função da altitude ( $(h)$ ), o azimutal em função da altitude e azimute ( $(h, Az)$ ), já o 3D considera a altitude, azimute e radial ( $(h, Az, D)$ ).

Além da técnica de traçado de raio ser aplicada na modelagem do atraso a fim de corrigi-lo nas medidas GNSS, ela também é aplicada no desenvolvimento de funções de mapeamento. Na próxima seção será apresentada a fundamentação na determinação de uma função de mapeamento.

Tabela 1 – Características do traçado de raio

	<b>Modelo do Caminho do Raio</b>			
		<b>Reta 1D</b>	<b>Curva Plana 2D</b>	<b>Arbitrário 3D</b>
<b>Modelo da Estrutura Atmosférica</b>	Vertical	Mais rápida (zenital)	1º mais usual	Degenera em 2D
	Azimutal	inválido	raro	inválido
	3D	inválido	2º mais usual	Mais rigoroso (mais demorado)

### 3.3 Função de mapeamento

As funções de mapeamento possibilitam obter o valor do efeito da atmosfera neutra em qualquer ângulo de elevação do satélite em relação ao receptor. Essas funções surgiram da necessidade de determinar o atraso inclinado, a partir do atraso zenital – que é único para todos satélites observados e um mesmo receptor. Essas funções podem ser determinadas aplicando a técnica de traçado de raio (NIEVINSKI, 2009). O atraso depende do estado da atmosfera ao longo de todo o caminho do raio, ou seja, será proporcional a porção de atmosfera que percorrer, entre satélite e receptor (Figura 7), como já apresentado.

A função de mapeamento mais simples foi definida a partir da lei da cossecante (“Lei de Snell-Descartes”) que considera suposições irreais, como: a terra sendo plana e a atmosfera estratificada horizontalmente, em que nenhuma variação da refração ocorre dentro de uma camada, ou seja, refração constante. Desse modo, o atraso no caminho do raio do sinal GNSS seria proporcional ao comprimento do caminho de propagação em cada camada e a função de mapeamento será idêntica à função cossecante.

A função de cossecante ( $\text{cossec}(e) = 1/\text{sen}(e)$ ), para ângulos de elevação de até 20°, é inadequada, pois apresenta discrepâncias significativas (erro de 1%, cerca de 2 cm no atraso). Logo, para ângulos de elevação mais baixos e aplicações que requerem maior acurácia (MONICO et al., 2009) esse modelo não é adequado. Por essa razão, foi necessário o desenvolvimento de funções mais elaboradas.

Ao longo do tempo, foram desenvolvidas diferentes funções (MARINI, 1972; DAVIS, 1985; HERRING, 1992; NIELL, 1996) buscando melhor acurácia na modelagem do atraso. Rocken et al. (2001) desenvolveram um novo método para função de mapeamento, usando modelos teóricos ou de PNT. A função de Marini (1972), considera a atmosfera horizontalmente estratificada, descrevendo a relação entre o ângulo de elevação e a função de mapeamento a partir de frações contínuas da função cossec ( $\varepsilon$ ). A partir da função de Marini (1972) as demais funções passaram a utilizá-la introduzindo melhorias, buscando atingir melhor qualidade.

A função de Marini (1972), a partir de frações contínuas da função *cossecante* e normalizada por Niell (1996), é expressa pela Equação (18):

$$f_m(e) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a}{b}}}{\text{sen}(e) + \frac{1 + \frac{a}{b}}{a}}. \quad (18)$$

A *Isobaric Mapping Function* (IMF) desenvolvida por Niell (2001) foi a primeira função de mapeamento baseada em dados de PNT, mostrando que com o emprego desses dados as deficiências da função de Niell (1996) são reduzidas e bons resultados foram obtidos.

Posteriormente, foi desenvolvida a VMF, com base na IMF, que foi obtida a partir da técnica de traçado de raio, com *input* de dados globais de PNT do ECMWF. A fim de aprimorar a VMF, Boehm et al. (2006) desenvolveram a VMF1, que apresenta diferencial em relação à VMF na obtenção dos parâmetros das funções hidrostática e úmida, pois considera 40 anos de dados de re-análise do ECMWF, além de melhorias no modelo matemático. Nessa função os resultados do traçado de raio, para o ângulo de elevação de 3°, são usados na determinação do parâmetro  $a$  da função de mapeamento. A grade dos coeficientes da função de mapeamento pode ser obtida em VMF1 (2019) (BOEHM et al., 2004a; BOEHM et al., 2006).

Os parâmetros  $b$  e  $c$  da VMF1 são constantes. A partir da função de Marini (equação (18)) é possível determinar o parâmetro  $a$  (BOEHM, 2004b):

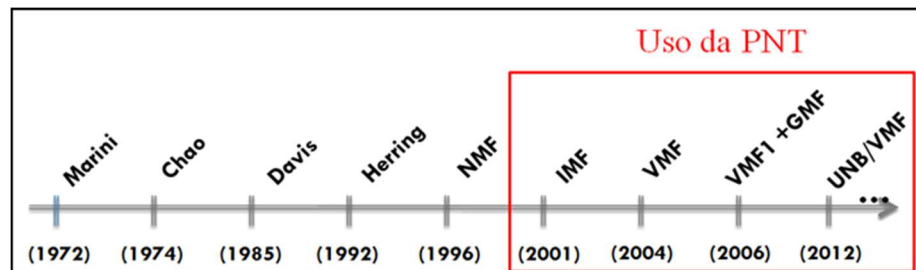
$$a = \frac{fm(e) \cdot \sin(e) - 1}{\frac{fm(e)}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}} - \frac{1}{1 + \frac{b}{1 + c}}}. \quad (19)$$

Além disso, em Santos et al. (2012) é apresentado o modelo da *University of New Brunswick – Canadá* (UNB-VMF1), considerando o mesmo modelo da VMF1, combinando algoritmos traçado de raio independentes (NIEVINSKI, 2009) e dados de entrada das re-análises do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (SANTOS et al., 2012; URUQUHART et al., 2014; UNB-VMF1, 2019). Ambas as funções, VMF1 e UNB-VMF1, apresentaram resultados similares. Logo, a UNB-VMF1 pode ser utilizada quando não for possível utilizar a VMF1 (BOEHM et al., 2011). Na Figura 8 são apresentadas em ordem cronológica algumas das principais funções de mapeamento desenvolvidas com destaque para as que usam a PNT.

Para aplicações que não necessitem de alto rigor de qualidade foram desenvolvidas as funções de mapeamento climatológicas (ou empíricas), consideradas também como modelos “cegos” (*blind model*), tal como o modelo de teóricos do atraso - GMF (*Global Mapping Function*) baseada na VMF1 (BOEHM et al., 2006b). Os coeficientes da GMF foram obtidos a partir de uma expansão dos parâmetros da VMF1 em esféricos harmônicos para uma

grade global. Outro modelo que pode ser citado é o GPT2, modelo de teóricos de pressão, temperatura e umidade GPT2 (*Global Pressure and Temperature*) (LANGLER, 2013).

Figura 8 - Linha do tempo do estado da arte das funções de mapeamento, em destaque as funções que usam PNT.



### 3.3.1 Funções de Mapeamento na modelagem do atraso

Na prática, a modelagem do atraso de propagação é realizada com os sinais na direção zenital e com a aplicação das funções de mapeamento, que consideram o ângulo de elevação do satélite, para a obtenção do atraso na direção satélite-receptor (inclinada) (*Slant Total Delay* - STD). A espessura da camada da atmosfera neutra, a que o sinal atravessa, é proporcional ao ângulo de elevação do satélite, como pode ser observado na Figura 7.

A razão entre o atraso inclinado ( $d$ ) e o atraso zenital ( $d^z$ ) determina o fator inclinado ( $d = d^z \cdot fm \Rightarrow fm = \frac{d}{d^z}$ ) (NIEVINSKI, 2009). Cada fator inclinado, resultante de uma época, posição e direção específicas, será um valor de fator de inclinação particular ( $k$ ). O modelo obtido a partir de cada fator de inclinação será determinado pela Equação (20). Esse modelo também é denominado de função de mapeamento ( $fm$ ). Essa função explica as variações dos valores do fator de inclinação em relação às suas variáveis independentes (NIEVINSKI, 2009):

$$fm = k(t, \varphi, \lambda, h, \varepsilon, \alpha). \quad (20)$$

Finalmente, para a determinação das funções de mapeamento a partir do método de traçado de raio é aplicada à componente hidrostática a Equação (16), normalmente o atraso geométrico ( $dg$ ) é adicionado a essa componente. Já à componente não hidrostática é aplicada a Equação (17). Portanto, as funções de mapeamento, hidrostática ( $fm_h$ ) e não-hidrostática ( $fm_{nh}$ ), são determinadas, respectivamente, pelas Equações (21) e (22) (NIEVINSKI, 2009):



$$fm_h = (ds_h + dg)/dz_h, \quad (21)$$

$$fm_{nh} = (ds_{nh}/dz_h). \quad (22)$$

A melhor aproximação do atraso é obtido pela soma dos atrasos zenital das componentes hidrostática ( $d_h^z$ ) e não hidrostática ( $d_{nh}^z$ ), multiplicadas por funções de mapeamento específicas para cada componente,  $fm_h(e)$  e  $fm_{nh}(e)$ , também denominadas de fator inclinado hidrostático e não hidrostático (Fih e Finh), as quais estão relacionadas com o ângulo de elevação ( $e$ ) do satélite. Sendo assim, o modelo que descreve o atraso de propagação em qualquer ângulo de elevação é expresso pela Equação (23).

$$d = fm_h * d_h^z + fm_{nh} * d_{nh}^z. \quad (23)$$

### 3.4 Posicionamento GNSS

Em poucas palavras uma posição poderá ser determinada ao se considerar: o tempo que o sinal se propaga do satélite até um ponto (receptor), multiplicado pela velocidade da luz, e pelas coordenadas do satélite, que são conhecidas. Seria simples determinar uma posição a partir de satélites GNSS, não fosse a interferência que o sinal sofre devido a diferentes meios e fontes, sendo que esses causam efeitos e erros na posição. Tais efeitos e erros sobre os sinais GNSS são devidos a quatro principais fontes: satélite, receptor, estação e propagação de sinal (MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017). Para minimizar ou eliminar os erros e efeitos ao longo do tempo, diferentes técnicas e modelos, que consideram a realidade física percorrida pelo sinal (e não o vácuo), têm sido desenvolvidos. A escolha das técnicas e modelos a serem utilizados dependerá da aplicação e da acurácia necessária (MONICO, et al, 2009).

Para obter melhores resultados é necessário realizar uma modelagem adequada para a realidade física da região e época de realização do posicionamento. Assim, para uma melhor qualidade da posição final, os erros que afetam os sinais GNSS devem ser minimizados ou eliminados por meio de modelagem matemática e/ou estimação de parâmetros no processamento das observáveis GNSS.

Conhecidas as coordenadas dos satélites, em um sistema de referência, é possível obter as coordenadas do usuário no mesmo sistema (MONICO, 2008; SEEGER, 2003). Porém, essas coordenadas são impactadas por diferentes efeitos, advindos de várias fontes, como já discutido, que resultam em erros que deterioram a acurácia das coordenadas finais

obtidas pelo usuário. No que concerne aos efeitos na propagação do sinal na atmosfera terrestre, foco dessa tese, podem ser citados os causados pela influência da ionosfera e da atmosfera neutra que, atualmente, representam as maiores fontes de erros nas observáveis GNSS.

As observáveis GNSS, empregadas no posicionamento são denominadas fase da onda portadora e pseudodistância. A medida de pseudodistância é obtida pelo tempo de propagação do sinal multiplicado pela velocidade da luz no vácuo. Aqui serão apresentados os modelos em relação ao sistema americano de posicionamento global (GPS), mas que podem ser expandidos aos demais sistemas. A equação da pseudodistância entre o satélite transmissor ( $s$ ) e o receptor ( $r$ ), de forma simplificada, pode ser dada pela equação (24) (MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017):

$$PD_r^t = \rho_r^{st} + c(dt_r - dt^t) + I_r^t + T_r^t + dm_r^t + \varepsilon_{PD_r^t}, \quad (24)$$

sendo:

$\rho_r^t$ : distância geométrica obtida do intervalo de tempo de propagação do sinal do satélite até o receptor, no tempo de transmissão ( $s$ ) e de recepção ( $r$ ) multiplicado pela velocidade da luz no vácuo ( $c$ );

$dt_r$ : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS;

$dt^t$ : erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS;

$I_r^t$ : erro causado pela ionosfera;

$T_r^t$ : erro causado pela atmosfera neutra (troposfera);

$dm_r^t$ : erro causado pelo multicaminho;

$\varepsilon_{PD_r^t}$ : erros da medida de pseudodistância (ruído).

A observável mais utilizada, para posicionamentos onde se busca alta acurácia, é a medida de fase da onda portadora (fase de batimento da onda portadora). Isso ocorre porque é uma observável mais precisa que a pseudodistância, porém ambígua devido ao número inteiro de ciclos entre o receptor e o satélite, no instante da primeira observação. A fase da onda portadora pode ser obtida pela diferença entre a fase gerada no satélite e a réplica gerada no receptor, ambas no instante de recepção. Apenas uma parte fracionária é medida, e o número inteiro de ciclos que é desconhecido é chamado de ambiguidade ( $N_r^t$ ). A equação da fase da onda portadora é apresentada na Equação (25) (MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017):

$$\varphi_r^t = f \left( \frac{\rho_r^t - I + T}{c} \right) + f(dt_r - dt^t) + (\varphi^t - \varphi_r) + N_r^t + \varepsilon_{\varphi_r^t}, \quad (25)$$

onde:

$f$  : frequência do sinal da fase;

$\varphi^t$ : fase gerada no satélite;

$\varphi_r$ : fase recebida no receptor;

$N_r^t$ : ambiguidade da fase;

$\varepsilon_{\varphi_r^t}$ : erros da fase da onda portadora.

Conhecidas as observáveis GNSS, o próximo passo é selecionar o método de posicionamento. Um método que vem sendo amplamente empregado é o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). O PPP é uma técnica de posicionamento que pode fornecer as coordenadas de um ponto com alta acurácia: acurácia decimétrica no modo estático e centimétrica no cinemático. Sendo que no modo estático pode atingir a ordem de poucos centímetros, de acordo com tempo e condições de rastreamento (MARQUES, 2012; MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTENBRUCK, 2017).

Para obter tal acurácia são necessários receptores de dupla frequência e a modelagem ou minimização dos efeitos/erros que interferem no sinal GNSS. No PPP são utilizados dados de órbitas e relógios disponibilizados pela rede global de serviços GNSS (IGS – *International GNSS Service*), além da modelagem para os erros advindos da ionosfera e da atmosfera neutra e as demais fontes existentes (SEEBER, 2003).

Com a modelagem dos erros no PPP busca-se melhorar a acurácia no posicionamento com a menor quantidade possível de dados, ou seja, otimizar o tempo de convergência. A convergência do PPP é o tempo de estabilização da precisão dos parâmetros envolvidos, e sua qualidade pode ser analisada a partir da série temporal das precisões das coordenadas estimadas no PPP (SILVA et al., 2016). O tempo de convergência, ou intervalo de tempo de inicialização do PPP, para que o posicionamento atinja precisão decimétrica é, em geral, em torno de 30 minutos, podendo ser mais longo para precisão centimétrica. Marques et al. (2014) mostram que, em aplicações em tempo real, o tempo de convergência pode atingir 1 hora com acurácia de 10 a 5 cm.

## 4. DESENVOLVIMENTO DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO BRASILEIRA (BMF)

Para desenvolver os objetivos propostos nessa tese de doutorado e validar sua hipótese foi de suma importância ter o domínio da metodologia aplicada na determinação da função de mapeamento empregando a PNT. Nessa seção é apresentado, em formato de metodologia, todo o percurso para o desenvolvimento da função brasileira. A estrutura deste Capítulo está organizada de forma a apresentar: os dados utilizados tanto no desenvolvimento dos experimentos quanto na validação dos mesmos (Seção 4.1); as estações selecionadas de acordo com as suas regiões (Seção 4.2); assim como a técnica de traçado de raio aplicada no desenvolvimento da função de mapeamento a partir das constantes da VMF1 (Seção 4.3). A metodologia de avaliação será apresentada na Seção 4.4.

### 4.1 Descrição e amostragem dos dados

#### 4.1.1 Dados do WRF/PNT

Nas aplicações geodésicas, como no meio civil, as coordenadas de tempo ou a padronização desse são em relação ao Tempo Universal Coordenado (UTC – *Coordinated Universal Time*). Na aviação (cartas de navegação) e nos arquivos de PNT na meteorologia o tempo utilizado é o tempo zulu para expressar as 24 horas do dia. Esse termo advém do alfabeto fonético da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), pois a palavra usada para Z (fuso horário de referência ou Greenwich - zero) é zulu. A hora Z e o UTC são similares, e têm o mesmo objetivo em comum: padronizar o tempo entre diferentes fusos horários (nível global ou regional) ([greenwichmeantime.com/info/history/tz-designations](http://greenwichmeantime.com/info/history/tz-designations) ; [www.cptec.inpe.br/faq/o-que-significa-horario-zulu](http://www.cptec.inpe.br/faq/o-que-significa-horario-zulu)). Assim, as abordagens de tempo, nessa metodologia e nos experimentos, se referem ao horário UTC ou Z.

Os dados do PNT/WRF para realização dos experimentos dessa tese foram obtidos no CPTEC/INPE, a partir do Supercomputador do centro, pois não estavam operacionais no momento (abril de 2018). O período dos dados compreende um ano: 27 de fevereiro de 2016 a 27 de fevereiro de 2017. Algumas das principais características dos dados serão apresentadas a seguir.

Os arquivos brutos das previsões do WRF contêm informações de 89 variáveis com resolução horizontal de 5km e resolução vertical (espaçamento vertical entre as

camadas) de 25 níveis de pressão (hPa) (1000 975 950 925 900 875 850 825 800 775 750 700 650 600 550 500 450 400 350 300 250 200 150 100 50), além de resolução temporal horária. A cada análise são disponibilizadas até 72 horas de previsões horárias (até 3 dias). Atualmente – desde agosto de 2018 - os dados do WRF podem ser acessados em: [ftp1.cptec.inpe.br/modelos/tempo/WRF/ams\\_05km/brutos](ftp1.cptec.inpe.br/modelos/tempo/WRF/ams_05km/brutos). Os diretórios são referentes às épocas: yyyy (ano - 4 dígitos); mm (mês – 2 dígitos); dd (dia do mês – 2 dígitos); e hh (hora da análise - 00 ou 12 UTC – 2 dígitos). Os arquivos com épocas correspondentes aos seus diretórios contêm as previsões horárias (hp) (yyyymmddhh+ yyyymmddhp).

Esses arquivos são disponibilizados no formato .grib (armazenamento dos dados em grade) e associados a eles estão os arquivos textos (.ctl). Os arquivos grib contêm a descrição dos dados (número de níveis, variáveis, previsão e análise, extensão da região em latitude e longitude e números de pontos, etc). Uma grade do WRF com extensão sobre a América do Sul contém 1402 pontos em latitude e 1476 em longitude, que perfazem uma grade de 2069352 nós de informações das variáveis atmosféricas. Logo, por meio de técnicas de interpolação é possível obter informações das variáveis atmosféricas para qualquer ponto dentro dessa área de abrangência.

O tamanho dos dados brutos para um dia excede 28 GB (400MB por hora de previsão x 72h), o que ampliado para um ano de dados resulta em 10TB. Para supercomputadores como o do CPTEC/INPE isso não é uma limitação, já para computadores comuns isso pode representar um obstáculo.

Devido ao tamanho dos arquivos dos dados brutos foi realizado um “recorte” nos arquivos (empregando a plataforma UNIX e programa em linguagem Python), resultando em amostras dos dados brutos. Essas amostras são compostas de 9 das 89 variáveis – apenas as variáveis atmosféricas utilizadas na modelagem do atraso: pressão, temperatura (superfície e perfil), e perfis de umidade. Os dados obtidos são referentes apenas a análise das 12 UTC. O período foi reduzido, de 72 horas de previsão para apenas 24 horas, buscando as previsões mais próximas à análise de 12h UTC. Assim, os arquivos da amostra foram reduzidos de 28 GB diários para 10GB e de 10TB dos dados anuais para 3,5 TB (35%). Essa redução não foi mais expressiva pois a maioria das variáveis das amostras geradas possui diferentes níveis (perfil), que tem maior tamanho - 4 das 9 do arquivo bruto. Mesmo após a redução significativa do tamanho dos dados, para o processamento foi necessária a utilização de um computador de alto desempenho (redução de cerca de 12 min de processamento em relação a computador comum – Memória 8GB e 1TB HD) (12 GB de Memória, e 11 TB de HDs).

#### 4.1.2 Dados das radiossondas

Os dados de Estações Meteorológicas de Altitude (EMA) ou de radiossondagem, aplicados nessa tese, foram disponibilizados pela Universidade de Wyoming dos Estados Unidos da América. Esses dados - perfis das variáveis de pressão, temperatura, umidade, direção do vento, e etc. - são disponibilizados diariamente e em duas épocas, 00h e 12h UTC, podendo ser obtidos em: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Porém, podem ocorrer períodos, para uma dada estação, sem observações. As épocas se referem à aproximadamente ao horário de lançamento dos balões (Seção 2.3.1), ou seja, ao longo de todo o globo as radiossondas são lançadas, aproximadamente, em hora UTC, concomitantes.

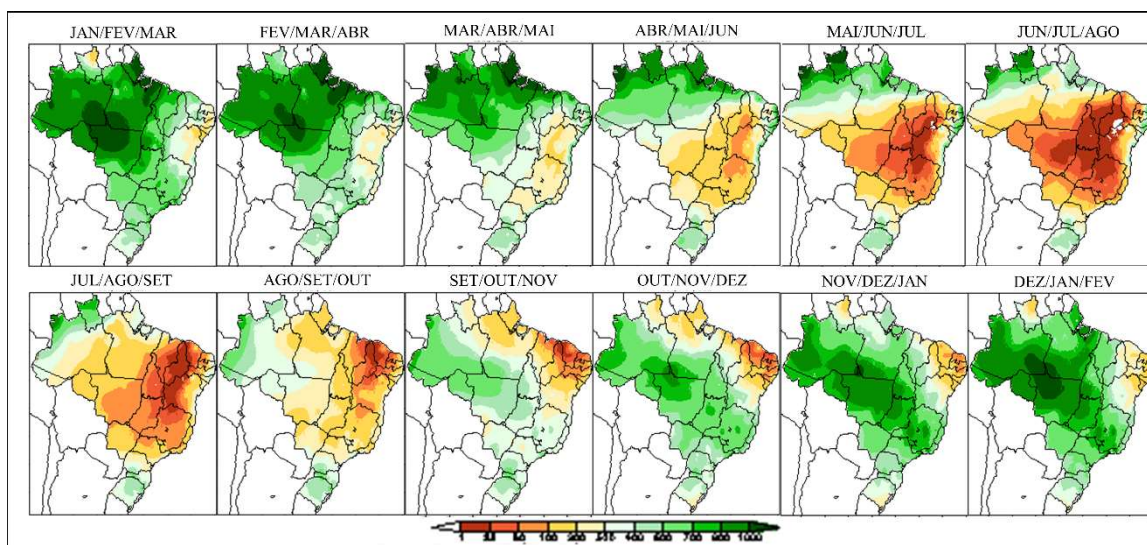
A altitude máxima é de cerca de 25 km, isto é, atingindo até 100 níveis de pressão – os níveis são variáveis de acordo com cada lançamento e estação (hPa) (1000 925 910, 878,... 50...30..28,9 27,7 27,5 26,5), ou seja, com um maior número de níveis que as dos dados do WRF/PNT. Os dados disponibilizados das radiossondas perfazem cerca de 7MB para um ano de dados para cada estação, de duas épocas (00 e 12 UTC), podendo ser até a metade na ausência de dados. As estações selecionadas serão apresentadas na próxima seção.

#### 4.2 Regiões selecionadas

As características atmosféricas são distintas de acordo com a época do ano e região do Brasil, como já foi discutido. Com o intuito de investigar a modelagem do atraso sob diferentes condições climáticas, assim como sua qualidade, foram selecionadas algumas estações que contemplam as diferentes características climatológicas brasileiras. A umidade é a variável que apresenta maior variabilidade de acordo com a região e época, como discutido na Seção 2.3.1, por essa razão essa variável foi utilizada na escolha das estações.

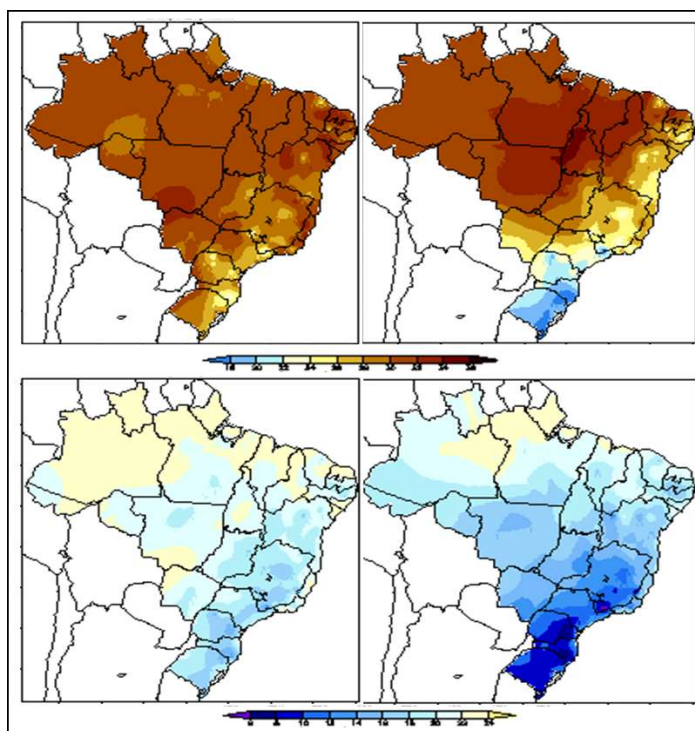
Na Figura 9 é apresentado um panorama climatológico com relação à precipitação no Brasil por trimestres subsequentes, perfazendo um ano. Note que ocorre variação de 1 mm a 1000 mm na precipitação, quanto mais verde maior a precipitação. Assim, como pode ser observado o período de maiores valores de precipitação ocorrem na região Norte e parte do Centro-Oeste do país no primeiro trimestre (Jan-Fev-Mar). A região entre o Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste, no trimestre de junho-julho-agosto, se destaca como a de menor precipitação. Outra variável importante na modelagem do atraso é a temperatura.

Figura 9 – Climatologia trimestral brasileira da precipitação.



Fonte: <http://infoclima1.cptec.inpe.br/#>

Figura 10 – Climatologia trimestral brasileira da temperatura no verão e no inverno.



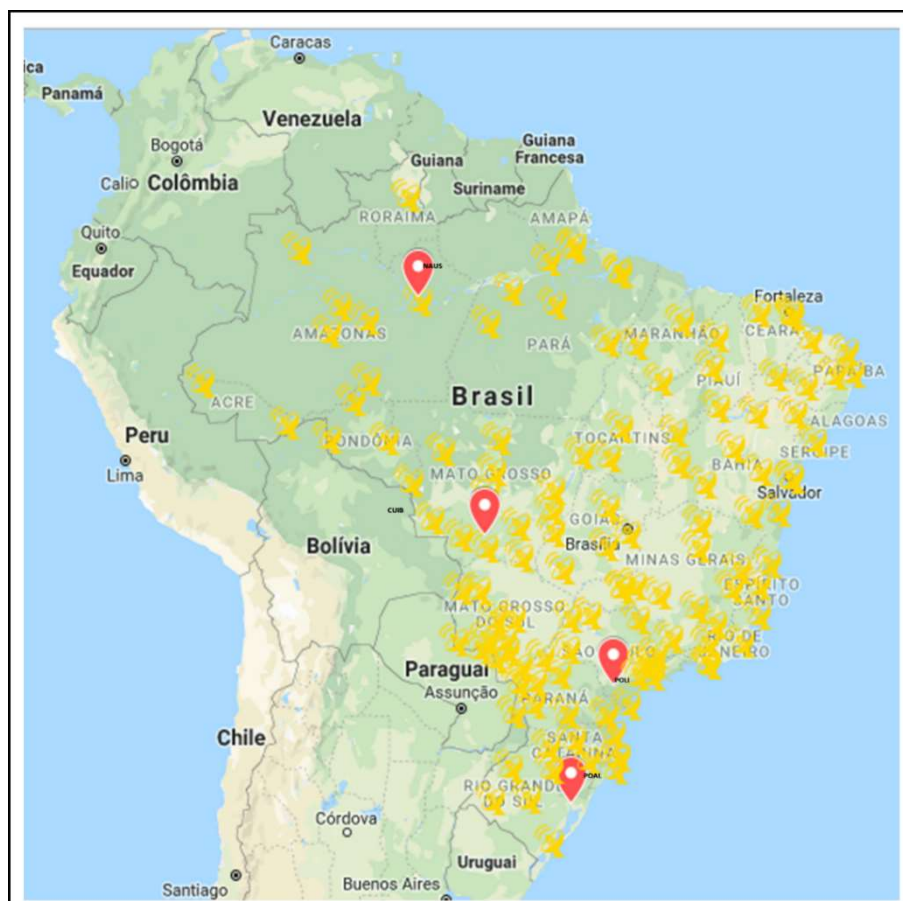
Fonte: <http://infoclima1.cptec.inpe.br/#>

Na Figura 10 é apresentada a climatologia da temperatura no verão – trimestre janeiro-fevereiro-março – e no inverno – junho-julho-agosto. Na parte superior da figura é apresentada a climatologia de temperatura máxima e na parte inferior de mínima. A região Sul se destaca, em relação a todo o Brasil, em ambas climatologias: de máxima no inverno e de mínima em ambas estações (verão e inverno), com valores próximos a zero e até negativo no

inverno. As mais altas temperaturas ocorrem nas regiões Centro-Oeste e Nordeste, mesmo no inverno. A partir das climatologias (Figura 9 e Figura 10) e dos dados da radiossondagem disponíveis, as regiões selecionadas para investigação foram: Norte; Centro-Oeste; Sudeste e Sul do país. Na região de Tocantins, com grande variação de umidade, não há dados de radiossondas disponíveis para o período avaliado nessa tese, por isso não foi selecionada.

Diante das regiões descritas foram selecionadas as estações a serem utilizadas na metodologia dessa tese, tanto da RBMC quanto das radiossondas. Na Figura 11 são apresentadas as estações selecionadas da RBMC, sendo elas, Manaus – AM (NAUS); São Paulo – SP (POLI); Cuiabá – MT (CUIB) e Porto Alegre - RS (POAL). Na Figura 12 são apresentadas as EMA, localizadas próximas às estações da RBMC: Manaus – AM (SBMN); São Paulo – SP (SBMT); Cuiabá – MT (SBCY) e Porto Alegre - RS (SBPA).

Figura 11 – Estações da RBMC, em destaque as estações selecionadas



Fonte: Adaptada de IBGE (2019).



Figura 12 – Estações de lançamento das radiossondas, em destaque as estações selecionadas.



Fonte: Adaptada de <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

#### 4.3 Metodologia do traçado de raio – BMF

Nessa seção será apresentada a metodologia para o desenvolvimento da função de mapeamento a partir das constantes (b, c) da VMF1, denominada função de mapeamento brasileira BMF (em inglês, *Brazilian Mapping Function*). Essa função foi desenvolvida a partir do programa de traçado de raio, *Raytracer* desenvolvido por Nievinsk (2009) (detalhes na Seção 3.2). Inicialmente foi necessário realizar uma investigação sobre o funcionamento do programa *Raytracer* – formato dos dados de entrada; processamento; e dados de saída. Essa etapa consistiu em compreender/utilizar a metodologia de modelagem da função de mapeamento empregando PNT pelo *Raytracer*. Paralelamente foi realizada uma descrição das funções que compõe esse programa, assim como do *Raytracer* em toda sua complexidade (Seção 3.2.1).

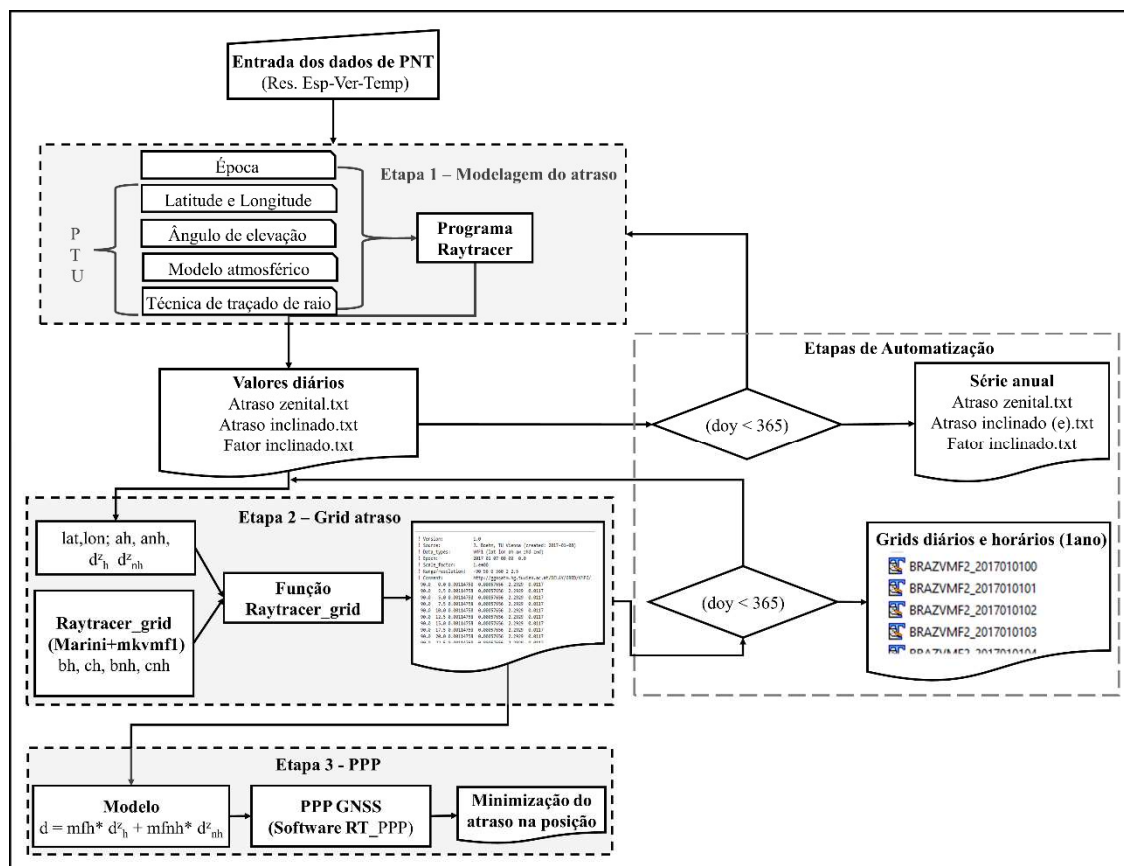
Após a fase de investigação do programa, iniciou-se a fase de adaptação do *Raytracer* quanto à leitura e processamento dos dados do modelo WRF. Essa adaptação se fez

necessária pois a resolução espacial e temporal do WRF é diferente das anteriores já implementadas (ECMWF, NCEP, etc.). As adaptações realizadas também se deram quanto ao sistema de projeção do modelo, a projeção de Lambert Conforme do qual a grade (*grid*) do modelo está associada. Essa é uma projeção cônica (superfície da Terra representada por um cone, em contato com dois paralelos) e conforme (mantem a forma e o ângulo). Em que os meridianos são considerados como linhas retas (raios) que convergem em um ponto (vértice do cone) e os paralelos são arcos circulares concêntricos a esse ponto. A conformidade apresenta falha nos polos, onde há distorção angular. O polo no mesmo hemisfério é representado por um ponto, o outro está no infinito (SNYDER, 1987). Uma das vantagens do uso dessa projeção é a preservação da forma de pequenas áreas, algo muito importante para modelos de PNT regional, como o WRF.

Adaptado o *Raytracer* para leitura dos dados do WRF foram realizados testes iniciais quanto à modelagem do atraso a partir da refratividade e dos constituintes atmosféricos que o descrevem (mais detalhes seção 3.1.2). Avaliados esses valores quanto a coerência de magnitude esperada para cada componente do atraso (hidrostática e não hidrostática), iniciou-se testes em relação ao fator inclinado (razão entre o atraso inclinado e o zenital - Seção 3.1.2). Em seguida foi realizada a determinação de  $a$  ( $a_h$ ,  $a_{nh}$ ) da função de mapeamento, em suas duas componentes, com base em  $b$  e  $c$  ( $b_h$ ,  $c_h$  e  $b_{nh}$ ,  $c_{nh}$ ) da VMF1 (Seção 4.1.1). O critério de coerência de valores foi realizado ao comparar os valores obtidos com os disponibilizados pela VMF1 (<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG>). A última fase de testes foi a de gerar uma grade contendo o atraso zenital e os parâmetros para determinar a função de mapeamento correspondente à mesma época e localização (latitude e longitude).

Concluída a fase de testes e adaptações ao *Raytracer* iniciou-se a etapa de automatização de todo o processo de geração do atraso e sua função de mapeamento para América do Sul e Brasil. Na Figura 13 é apresentado o fluxograma das três principais etapas para obtenção da BMF.

Figura 13 – Fluxograma das etapas da metodologia geral da BMF



A primeira etapa consistiu na modelagem do atraso a partir dos dados WRF/PNT, onde inicialmente são determinadas as épocas dos dados de entrada, a localização (latitude e longitude dentro do grid do PNT) e o ângulo de elevação inicial com os quais será realizado o traçado de raio. E, por último, a configuração do *Raytracer* em que é selecionado o modelo da estrutura atmosférica. Nos experimentos foi utilizado o modelo de estrutura atmosférica 1D com modelo de caminho do raio 2D; no *Raytracer* isso corresponde à rotina `atm_sphosc_nwm` com opção `get_refraction_grad_2d` (Seção 3.2).

Os resultados dessa etapa são: atraso zenital ( $d_h^z$  e  $d_{nh}^z$ ); atraso inclinado ( $d_h$  e  $d_{nh}$ ) – nessa metodologia foi adotado ângulo de elevação de  $3,3^\circ$  (como na VMF1); e os fatores inclinados ( $k_h$ ,  $k_{nh}$ ). Na automatização da etapa 1 foram calculados os atrasos e seus fatores de inclinação para todo o período de dados disponibilizados (1 ano).

A segunda etapa representa o cálculo da grade do atraso, que teve como dados de entrada os resultados da primeira etapa. Na etapa 2 foi aplicada a função de Marini (Equação 19, Seção 3.3) para obtenção dos parâmetros  $a$ , e os parâmetros  $b$  e  $c$  (constantes) foram obtidos a partir da VMF1. A última fase dessa etapa foi a de realizar ajustes no programa

*Raytracer\_grid*, programa para gerar uma grade de atraso zenital e de parâmetros  $a$  – hidrostáticos e não hidrostáticos – concomitante à grade do WRF (América do Sul, resolução espacial de 5km e temporal de 1 hora). Determinada a grade contendo os valores do atraso e parâmetros da função de mapeamento associados, foi realizada a fase de automatização, que consistiu em determinar a grade do atraso da América do Sul.

A terceira e última etapa foi a de realizar o PPP a partir das grades de atraso da BMF-VMF1, para realizar a minimização do atraso e avaliar a qualidade do posicionamento ao aplicá-lo. Os critérios e estatísticas de avaliação são apresentados na Seção 4.4. Os resultados e avaliações da qualidade de cada uma das etapas apresentadas no fluxograma (Figura 13) são apresentados no Capítulo 5.

#### 4.4 Metodologia de avaliação

A avaliação dessa tese se divide em três etapas. A primeira etapa conta com a avaliação do atraso zenital, onde nas estatísticas de avaliação são considerados os dados de referência (seção 4.1.2). Na segunda, a série de dados do atraso e fator inclinado não possuem dados de referência, por isso os resultados são avaliados em relação às suas médias. E, na terceira etapa, na avaliação da BMF no PPP, são realizadas análises quanto à dispersão e tendência, podendo qualificar os dados pela acurácia.

Assim as métricas aplicadas em cada etapa foram: na primeira etapa (seção 5.1) são avaliados a discrepância ( $e$ ) e sua média, o viés ( $\bar{e}$ ) e a raiz do erro quadrático médio (REQM); na segunda etapa (seção 5.2), na avaliação do atraso e fator inclinado, são considerados os valores médios. Nesse caso, as estatísticas aplicadas são a média ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão ( $DP$ ), apenas essas estatísticas podem ser consideradas visto que não há dados de referência para avaliar discrepância ou acurácia; na terceira etapa (capítulo 6), é calculada a discrepância ( $e$ ) e o viés ( $\bar{e}$ ), a precisão ( $\sigma$ ) é fornecida como resultado de qualidade do posicionamento (MONICO, 2008; MARQUES, 2012; GEMAEL et al., 2015). As métricas estatísticas consideradas nessa tese são definidas a seguir.

A média do atraso ( $\bar{x}$ ) em cada época ( $i$ ) é obtida a partir da equação (26) (DEAKIN & KILDEA, 1999):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, i = 1, \dots, n. \quad (27)$$

A discrepância ou erro ( $e$ ) que expressa o efeito sistemático é calculado a partir da diferença do atraso calculado ( $x_{c_i}$ ) e o valor de referência (a partir da radiossondagem) ( $x_{r_i}$ ), ambos em dada época ( $i$ ) (Equação (28)):

$$e_i = (x_{c_i} - x_{r_i}), i = 1, \dots, n. \quad (28)$$

O viés (*bias*) ou erro médio ( $\bar{e}$ ) é a média das diferenças ( $e$ ) entre o valor do atraso calculado e a o valor de referência, cuja média esperada é nula (Equação (29)):

$$\bar{e} = \frac{\sum e_i}{n}, i = 1, \dots, n. \quad (29)$$

Quando não há medidas de referência, o viés é determinado pela diferença entre o valor calculado e valor médio ( $\bar{x}$ ), logo o viés da média ( $\bar{e}_m$ ) é obtido por (MIKHAIL & ACKERMAN, 1976; DEAKIN & KILDEA, 1999; GEMAEL et al., 2015; MONICO et al., 2009):

$$\bar{e}_m = \frac{\sum(x_{c_i} - \bar{x})}{n}, i = 1, \dots, n. \quad (30)$$

Para estimar o grau de precisão – medida de incerteza ou dispersão dos resultados (no caso do posicionamento) - foi aplicada a métrica de desvio padrão ( $DP$ ), que expressa o grau de proximidade entre os valores calculados e a média deles, relacionando assim a dispersão da distribuição dos dados. O  $DP$  pode ser obtido a partir da Equação (31) (MIKHAIL & ACKERMAN, 1976; DEAKIN & KILDEA, 1999; GEMAEL et al., 2015):

$$DP = \sqrt{\frac{\sum(x_{c_i} - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (31)$$

A raiz do erro quadrático médio (REQM), mede o desvio de uma variável aleatória em função de um valor padrão (média, por exemplo). Essa métrica pode ser aplicada quando não há dados de referência, apenas a média dos valores calculados. O REQM pode ser obtido a partir da Equação (32) (MIKHAIL & ACKERMAN, 1976; DEAKIN & KILDEA, 1999; GEMAEL et al., 2015; MONICO et al., 2009):

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n}}. \quad (32)$$

A análise de acurácia do posicionamento, se refere ao grau de proximidade de uma estimativa com seus parâmetros. A acurácia ( $m$ ) é calculada a partir da precisão da variável aleatória em apreço ( $\sigma$ ) – obtida a partir do ajustamento (GEMAEL et al., 2015;

MONICO, 2008) – e da tendência ou discrepância deles, do viés ( $\bar{e}$ ) (MONICO et al., 2009). É de se esperar que o  $\sigma$  esteja no mesmo nível da precisão advinda do ajustamento, dada pela MVC (Matriz Variância e Covariância) (MONICO, 2008; MARQUES, 2012). A acurácia ( $m^2$ ) é expressa na Equação (33) (DEAKIN & KILDEA, 1999; GEMAEL et al., 2015; MONICO et al., 2009):

$$m^2 = \sigma^2 + \bar{e}^2. \quad (33)$$

A equação (33), para amostras grandes, é considerada semelhante ao *EQM*, ou ainda *REQM*<sup>2</sup> (Equação (32)). Porém,  $m^2$  (Equação (33)) apresenta-se como uma melhor forma de avaliar acurácia, visto que considera dois termos independentes: precisão ( $\sigma$ ) e tendência (viés -  $\bar{e}$ ), isto é, pode-se diferenciar erros aleatórios e sistemáticos. Para medidas em que não haja tendência, a acurácia e precisão podem ser confundidas (MIKHAIL & ACKERMAN, 1976; DEAKIN & KILDEA, 1999; MONICO et al., 2009).

Baseada na metodologia apresentada no Capítulo 4, o próximo Capítulo (5) irá apresentar em cada subseção detalhes da metodologia e análises dos resultados obtidos com o intuito de tornar mais clara e objetiva cada abordagem.

## 5. METODOLOGIA, EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES DO ATRASO E FUNÇÃO DE MAPEAMENTO

### 5.1 Metodologia de avaliação da BMF na modelagem do atraso zenital

A primeira estratégia para avaliar a qualidade da função de mapeamento proposta nessa tese (BMF) é quanto ao atraso zenital. Essa etapa é facilmente realizada, visto que o atraso obtido pode ser comparado com o calculado a partir de medidas de radiossondagem, consideradas como medidas de referência. As radiossondas fornecem medidas diretas das variáveis atmosféricas. Essa é a técnica mais utilizada, à nível mundial, para medir operacionalmente o perfil vertical de umidade (Seção 2.3.1). Já foi discutido que os perfis verticais das variáveis atmosféricas representam a melhor maneira (mais próximo da realidade atmosférica) de modelar o atraso. Mas vale destacar que, efeitos adversos que diminuem a eficiência das medidas das radiossondas não foram considerados nessa análise (SAPUCCI, 2005a,b).

Essa seção tem por objetivo avaliar a qualidade do atraso zenital obtido a partir da BMF (Capítulo 4) (*Raytracer* + WRF) – resultante da etapa 1 (Figura 13) - e o atraso determinado por meio dos dados de radiossondas aplicados às Equações (16) e (17). Sapucci (2001) apresenta um algoritmo para a determinação do atraso zenital não hidrostático a partir de dados de radiossonda. Tal algoritmo foi adaptado para realizar a modelagem do atraso zenital hidrostático, além de automatização para uma série de dados (LIMA, 2019).

Na Figura 14 é apresentado o fluxograma com as etapas de desenvolvimento da avaliação proposta nessa seção. Do lado esquerdo é possível notar o processo de modelagem do atraso zenital a partir da BMF; já do lado direito o atraso zenital a partir da radiossondagem. O atraso obtido pela BMF é comparado com o atraso considerado de referência. A análise de qualidade é realizada fazendo uso da Equação (29), que considera o viés e o REQM (Equação (32)) (Seção 4.4).

Nesse experimento foram utilizados dados do modelo de PNT/WRF, disponibilizados pelo CPTEC/INPE e da modelagem com radiossondas, a partir de duas estratégias (detalhes Seção 4.1):

- 1) série anual do atraso zenital - período de um ano dos dados do WRF (detalhes Seção 4.1.1) (27 fevereiro de 2016 à 27 de fevereiro de 2017) com épocas das análises de 12 h UTC (1h/dia). Como discutido, as análises representam de maneira mais real as variáveis atmosféricas - totalizando 365 épocas e que dispendeu tempo total de processamento de 2 horas. Os arquivos resultantes são no formato texto (.txt) da série anual e totalizam 8 KB,

extremamente menores do que o tamanho dos arquivos brutos que o geraram (Seção 4.1). Os dados de radiossondas foram selecionados referentes aos lançamentos das 12 UTC - compatíveis com as análises do WRF (disponível apenas 12h UTC) - calculado o atraso zenital, esse resultou em arquivos de 4KB, sendo neste caso o tempo de processamento de poucos minutos. A compatibilidade da época de análise do WRF e de lançamento das radiossondas, além do tempo de processamento, foram fatores importantes para essa definição de valores diários para análise anual;

2) série semanal do atraso zenital - período de uma semana de dados (27/02/16 à 05/03/16), selecionada devido à disponibilidade e concomitância dos dados do WRF e de radiossondagem. Para os dados do WRF foram utilizadas a análise e as 23 horas de previsão por dia, o que perfaz 24 épocas diárias (1h), totalizando 168 épocas (40 minutos de processamento), em arquivos (txt) de 4KB, com metade do tamanho dos anuais. Nessa estratégia os resultados horários diários (24 por dia) obtidos com a BMF foram avaliados em relação aos resultados diários (1 por dia) das radiossondas.

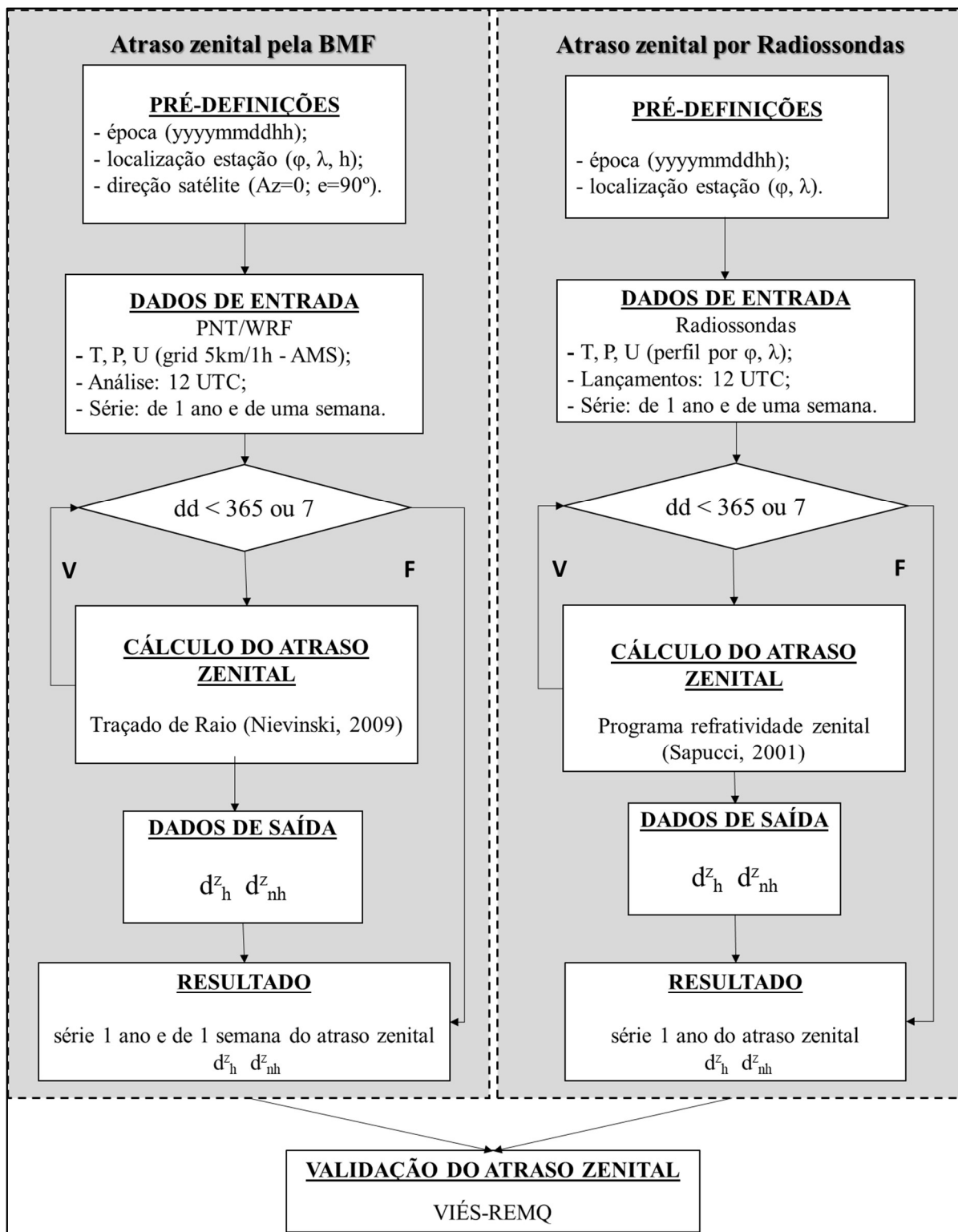
Essas estratégias foram realizadas buscando uma avaliação adequada dos resultados do atraso zenital obtidos com a BMF. De acordo com a variação temporal do valor do atraso – como já discutido – foi necessário analisar sua magnitude e qualidade nos diferentes períodos, do dia e do ano, além de uma avaliação da qualidade do atraso via BMF a partir de sua análise (seu melhor resultado) e de suas previsões, ou seja, investigar ao longo de um dia e uma semana qual a qualidade do atraso zenital obtido por meio das previsões do WRF.

Na Seção 4.2 foi apresentada a discussão quanto a variação da precipitação a partir da climatologia brasileira trimestral ao longo de todo o ano. A partir dessa seção foram definidas as estações a serem avaliadas, sendo definidas as localizadas em: Manaus – AM (NAUS); São Paulo – SP (POLI); Cuiabá – MT (CUIB); Porto Alegre - RS (POAL).

A direção do raio na técnica do traçado de raio foi determinada como azimute nulo ( $0^\circ$ ) e ângulo zenital ( $90^\circ$ ). Os dados selecionados do WRF foram aplicados à técnica de traçado de raio para a obtenção das medidas do atraso zenital. Esse processo foi realizado de forma iterativa para todos os dias da série (anual e semanal). A metodologia adotada nessa seção contemplando todas as especificidades citadas é apresentada na Figura 14



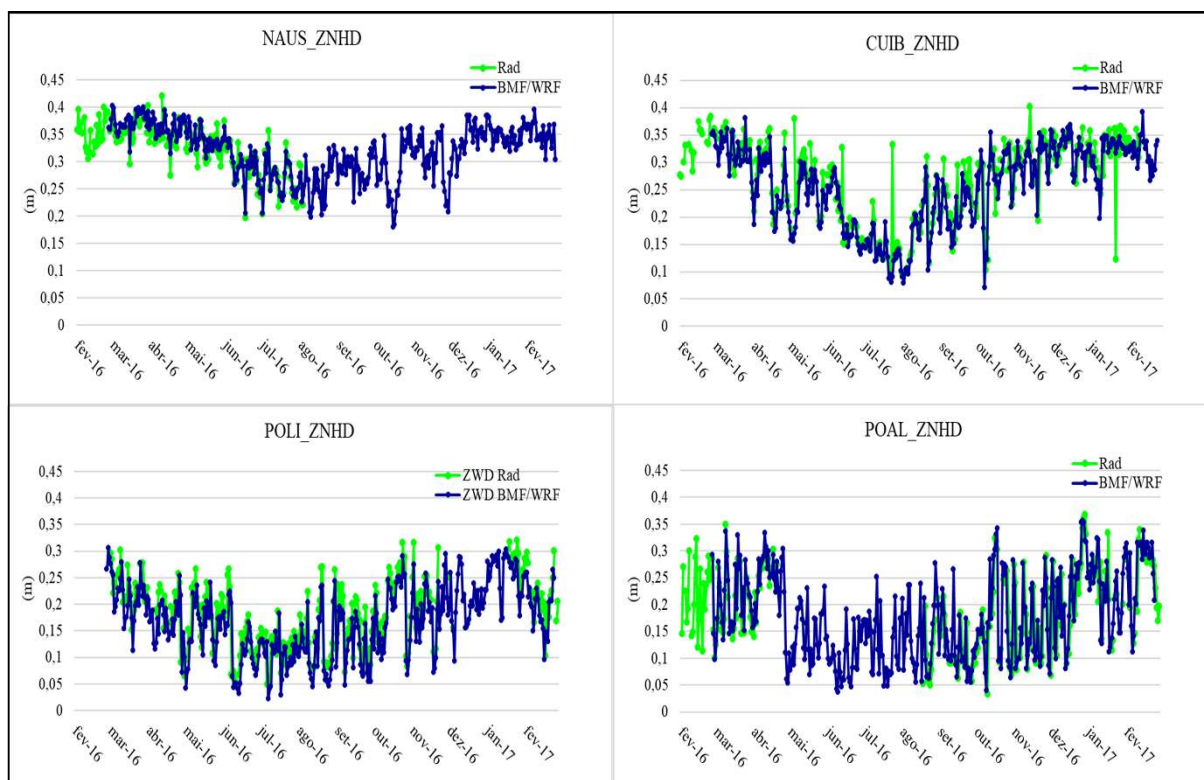
Figura 14 - Fluxograma da metodologia aplicada na avaliação do atraso zenital pela BMF/WRF em relação ao uso de radiossondas.



### 5.1.1 Resultados e análises da BMF na modelagem do atraso zenital: série anual (análises)

Nas Figuras 15 e 16 são apresentados os resultados obtidos na modelagem do atraso zenital não hidrostático e total, respectivamente, a partir das radiossondas (verde), e a partir da BMF (azul), para cada estação selecionada.

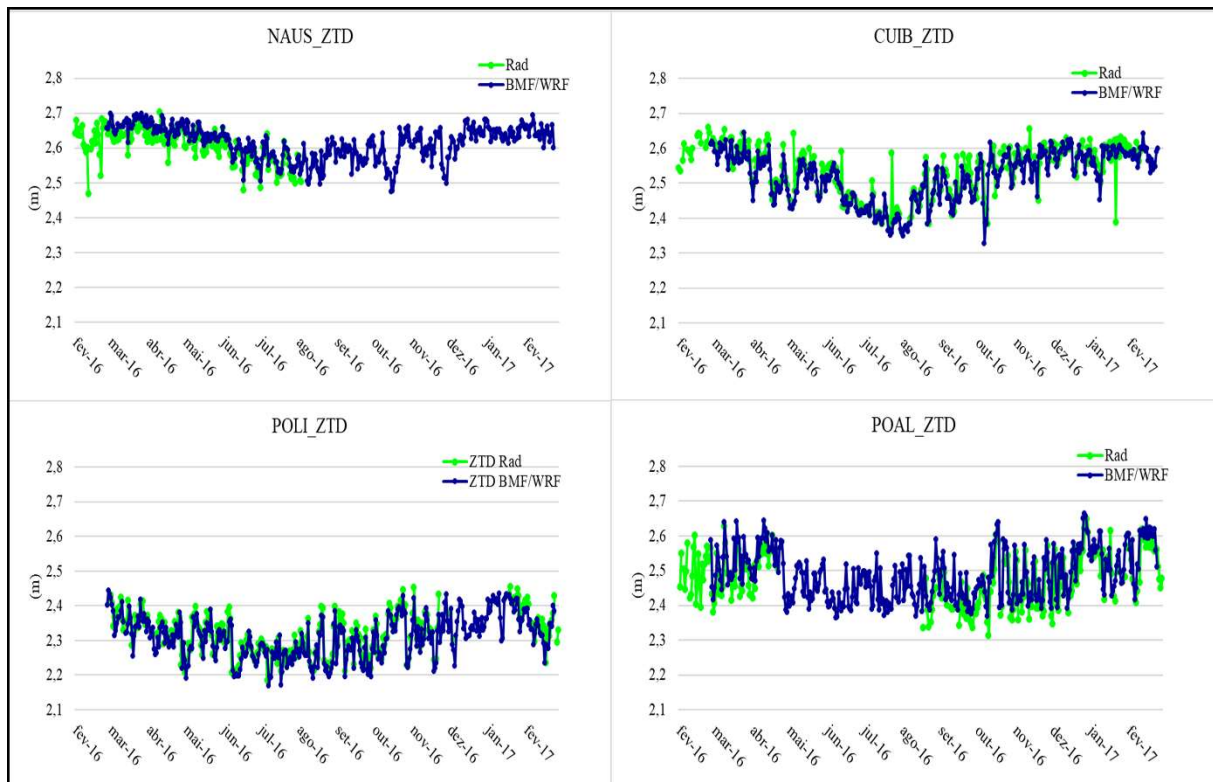
Figura 15 - Série anual do atraso zenital não hidrostático a partir da modelagem da BMF (azul) e das radiossondas (verde) por estação.



O atraso não hidrostático, Figura 15, descreve bem a variação da umidade de acordo com a estação do ano. Note que no verão (Jan-Fev-Mar) os valores são mais altos do que no período do inverno (Jun-Jul-Ago). Essa variação do atraso não hidrostático é mais significativa em CUIB, que no período do verão atinge até cerca de 40 cm; já no inverno tem valores em torno de 10 cm. Isso se justifica, pois, como apresentado na climatologia do Brasil na Seção 4.2 (Figura 9), a região de CUIB é marcada por altos valores de precipitação (próximo a 1000mm) no verão e baixos valores no inverno (inferiores a 30mm). NAUS tem a menor variação dos valores de atraso não hidrostático - no verão apresenta valores em torno de 40 cm e no inverno de 18 a 20 cm, o que também se justifica pela climatologia dessa região. Mesmo no inverno a precipitação ainda tem valores próximos a 400 mm. Os menores valores do atraso estão na estação POLI, não excedendo 35 cm no verão e no inverno próximo a 1cm. POAL, embora seja uma das regiões com as mais baixas temperaturas no inverno, possui alta umidade

nesse período, atingindo valores de precipitação próximos a 600mm. O que pode ser notado no atraso não hidrostático que atinge até 35 cm no verão, com valores inferiores no inverno, porém altamente variáveis (25 a 2,5 m).

Figura 16 - Série anual do atraso zenital total a partir da modelagem da BMF (azul) e das radiossondas (verde) por estação.



Analisando a Figura 16, NAUS apresenta os maiores valores (2,45m no inverno a 2,7m no verão), com diferenças entre as estações do ano superiores a 20 cm. CUIB, como no atraso não hidrostático, tem alta variabilidade nos valores do atraso zenital total entre as estações do ano. No verão atinge 2,65m e chega até 35 cm menor no inverno. POLI tem os menores valores, inferiores a 2,5m no verão e de até 2,15m no inverno. POAL tem valores de atraso zenital total com variação entre verão e inverno de até 40 cm. O menor valor ocorre em Jun/16 e o maior valor em Jan/17. A variabilidade dos valores é a maior em relação as demais regiões/estações.

Os valores do atraso zenital não hidrostático, do atraso zenital total, assim como suas variabilidades, reforçam a discussão de que o fato de considerar modelos teóricos do atraso (Hopfield e Saastamoinen) para o Brasil pode resultar em erros de até 30 cm de acordo com a região (NAUS-POLI) e superiores a 35cm de acordo com a época do ano (CUIB-verão e inverno). Um trabalho tem sido desenvolvido visando obter uma avaliação robusta do atraso

zenital, considerando diferentes modelos atmosféricos, em diferentes regiões e épocas do ano (LIMA, 2019).

A qualidade da modelagem do atraso zenital empregando a metodologia da BMF a partir das análises do WRF pode ser observada, de forma geral, a partir da concordância desse com o atraso zenital via radiossondas. Pode-se observar que tanto na Figura 15, quanto na Figura 16, ocorrem alguns valores do atraso zenital por radiossondas discrepantes da série, principalmente em relação à CUIB. Um exemplo disso ocorreu para o dia 27/7/16. Nesse caso, o valor do atraso não hidrostático para a radiossondagem foi de 30 cm, superior aos demais dias do mesmo período. Esse valor alto de atraso mesmo no inverno, período mais seco nessa região, é atípico. Uma possível explicação seria uma variação brusca de precipitação. Um outro exemplo ocorreu para o dia 21/1/17 (verão), em que o atraso não hidrostático tem valor de 0,12 cm, valor de inverno dessa região. Esse valor baixo pode ser explicado pela ausência de dados, pois não houve armazenamento de medidas de umidade nesse dia para a maioria dos níveis (apenas 2), talvez por erros de gravação.

Com o objetivo de avaliar a qualidade dos dados obtidos pela BMF, em comparação com a radiossondagem, a Figura 17 apresenta a análise do viés (Equação (29)) e da REQM (Equação (32)) do modelo proposto para as quatro estações avaliadas.

Analisando a Figura 17 e a tabela 2 nota-se que a REQM obtida quanto à componente não hidrostática apresenta os maiores valores. POAL é a estação em que o modelo BMF apresentou pior desempenho (5,6 cm). Já o melhor desempenho foi obtido na estação NAUS (1,7 cm). Para a componente hidrostática a REQM foi superior (2,7 cm) para POAL, já o menor valor foi obtido em NAUS (0,6 cm). Essa componente, como esperado, apresenta menor REQM que a não hidrostática, devido à maior dificuldade na modelagem da umidade do que da pressão. Assim, em relação ao atraso zenital total, é possível constatar que o pior desempenho da BMF foi em relação a estação POAL (6,3 cm), seguida de CUIB (5,6 cm), e o melhor desempenho foi obtida na estação NAUS (1,9 cm).

Figura 17 - Análise do viés e da REQM do atraso zenital hidrostático (ZHD), não hidrostático (ZNHD), e total (ZTD) para as estações NAUS-CUIB-POLI\_POAL.

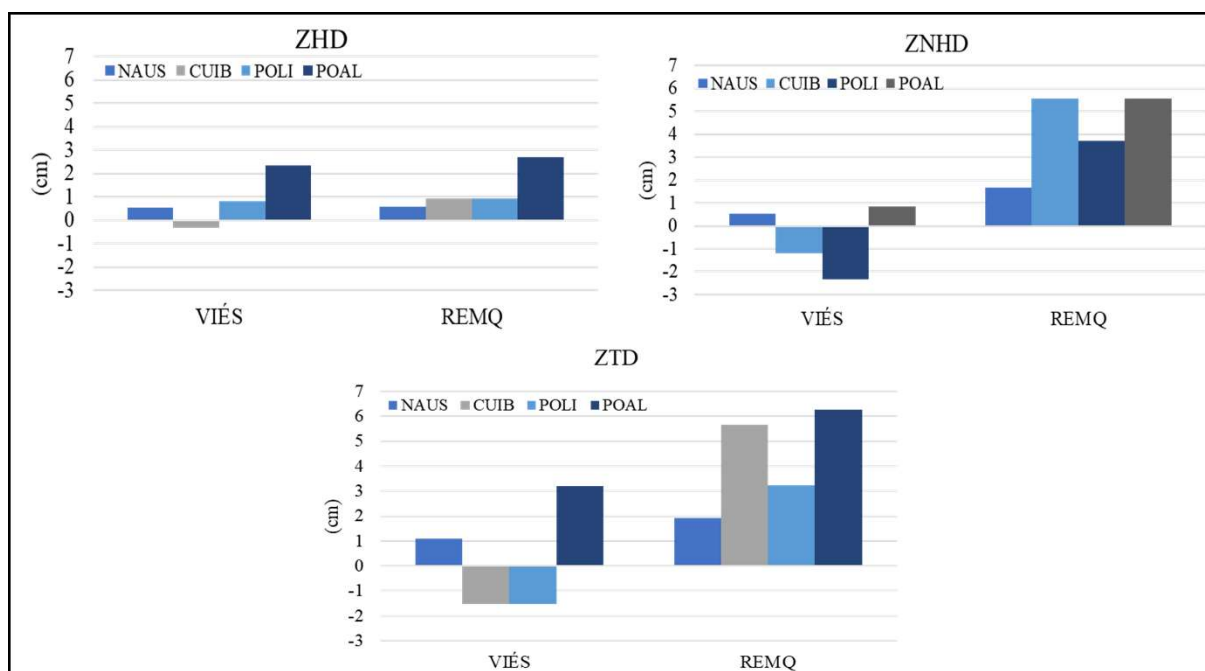


Tabela 2 - Síntese da análise do viés e da REQM do atraso zenital hidrostático (ZHD), do não hidrostático (ZNHD), e total (ZTD) em relação às estações NAUS-CUIB-POLI-POAL.

ZHD				
	NAUS	CUIB	POLI	POAL
VIÉS (cm)	0,56	-0,34	0,80	2,35
REQM (cm)	0,57	0,95	0,91	2,69
ZNHD				
	NAUS	CUIB	POLI	POAL
VIÉS (cm)	0,53	-1,18	-2,32	0,86
REQM (cm)	1,68	5,54	3,72	5,57
ZTD				
	NAUS	CUIB	POLI	POAL
VIÉS (cm)	1,08	-1,52	-1,53	3,21
REQM (cm)	1,93	5,65	3,24	6,26

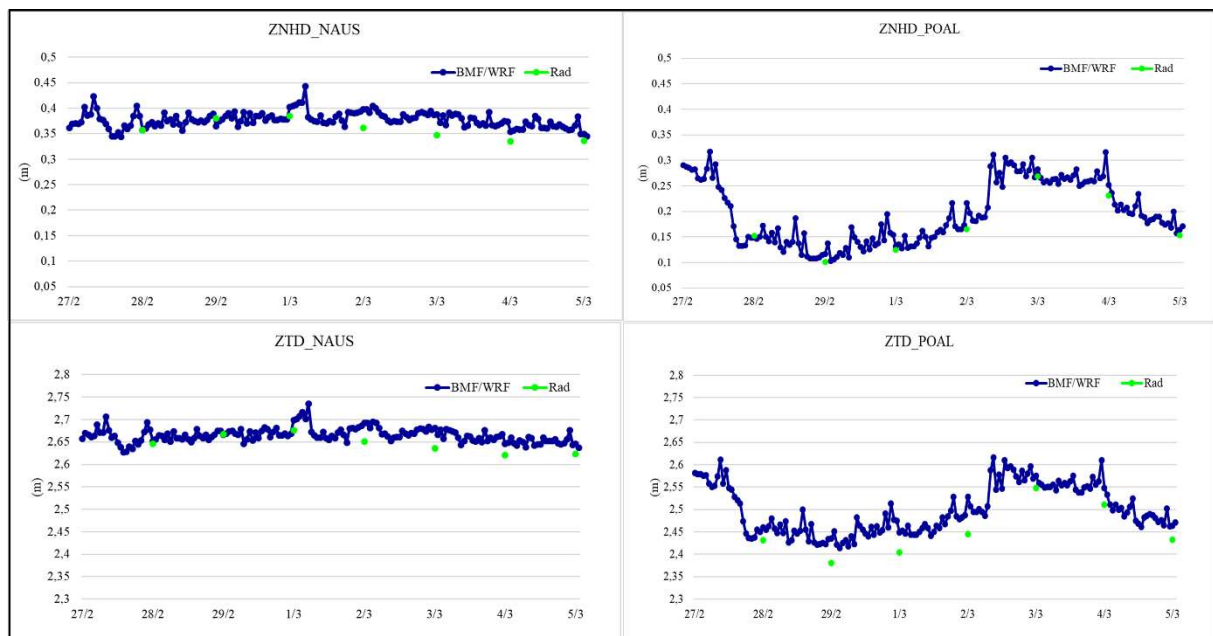
### 5.1.2 Resultados e análises da BMF na modelagem do atraso zenital: série semanal (previsões)

A avaliação semanal teve por objetivo avaliar a qualidade das previsões (23h/dia) do atraso zenital a partir do BMF/WRF em relação ao obtido pela radiossondagem, conforme metodologia proposta em Seção 5.1. As estações selecionadas foram NAUS e POAL, por apresentarem, na avaliação anual (Seção 5.1.1), melhor e pior acurácia, respectivamente. A semana (27/2/16 a 5/3/16) foi escolhida por contemplar o verão (maiores volumes de

precipitação) e nesse período ter dados do WRF e radiossondas disponíveis concomitantemente. Assim, com valores diários do atraso de referência (radiossonda) e horário por dia do WRF, foi possível realizar uma análise do atraso zenital de forma mais detalhada, considerando além da qualidade, também sua variabilidade ao longo de um dia.

Na Figura 18 pode ser observado que enquanto o atraso previsto pelo modelo BMF/WRF descreve a variabilidade horária, o atraso por radiossondas apresenta um único valor diário para cada dia da semana. Isso ocorre pois, como já discutido, as radiossondas fornecem os melhores valores da atmosfera neutra em um perfil, porém, tem baixa resolução temporal.

Figura 18 - Série semanal do atraso zenital não hidrostático e total a partir da modelagem da BMF (azul) e das radiossondas (verde) das estações NAUS e POAL.



O primeiro resultado a ser observado é que ao longo de um dia (27/2 por exemplo) o atraso não hidrostático pode variar cerca de 10 cm na estação NAUS. Na estação POAL a magnitude da variação do atraso não hidrostático, para o verão e dias subsequentes, ultrapassa 20 cm. O mesmo ocorre quanto à variabilidade do atraso zenital total (Figura 18). Embora não seja possível realizar uma avaliação da modelagem do atraso horário em relação a referência (radiossondas), é possível afirmar que se as estimativas do atraso possuírem valores horários, ocorre um ganho significativo em resolução temporal, em relação à radiossondagem.

Um resultado a ser destacado é que na estação POAL, para o dia 27/2, os valores do atraso não hidrostático (refletido no total) caem de 2,6 m para 2,4 no dia 28, e volta a apresentar um valor crescente, com maior valor em 03/03. A partir de dados históricos de

precipitação (CEIC, 2019) é possível verificar que no dia 27/2 as estações meteorológicas registraram precipitação média de 5,9 mm, nos dias subsequentes (28 e 29 de fevereiro) 0 mm, já no dia 03/03 houve um registro de 46,7 mm em média. Essa informação também pode ser confirmada pela umidade relativa histórica diária disponibilizada pelo INMET (2019). Em 27/2 com 85% e nos dias 01 e 02/03 entre 70 e 58%, respectivamente. Diante desse resultado pode-se concluir que o atraso não hidrostático de dada região representa de forma rigorosa a variação da umidade sobre a ela. Note que esse tipo de análise só pode ser realizado devido à avaliação do atraso horário semanal.

A Figura 19 e a Tabela 3 apresentam o viés (discrepância) e a REQM das duas estações (NAUS-POAL) – com mesma resolução temporal 12h UTC. A estação POAL tem os maiores valores de REQM (máximo em torno de 4,16 cm), sobre forte influência da componente não hidrostática. NAUS apresenta a melhor qualidade das previsões do atraso zenital. Como pode ser observado na Figura 19 o menor REQM para estação NAUS é referente a componente hidrostática (0,69 cm), para POAL o melhor resultado é verificado quanto a componente não hidrostática (2,02 cm). Logo, diante desses resultados e da Seção 5.1.1 pode-se concluir que a BMF apresentou melhor qualidade nas previsões do atraso zenital (duas vezes melhor) para NAUS, do que para POAL, a menos da componente úmida em que NAUS apresentou REQM de 0,12 cm pior que POAL.

Figura 19 - Análise do viés e da REQM do atraso zenital hidrostático (ZHD), não hidrostático (ZNHD), e total (ZTD) para às estações NAUS e POAL.

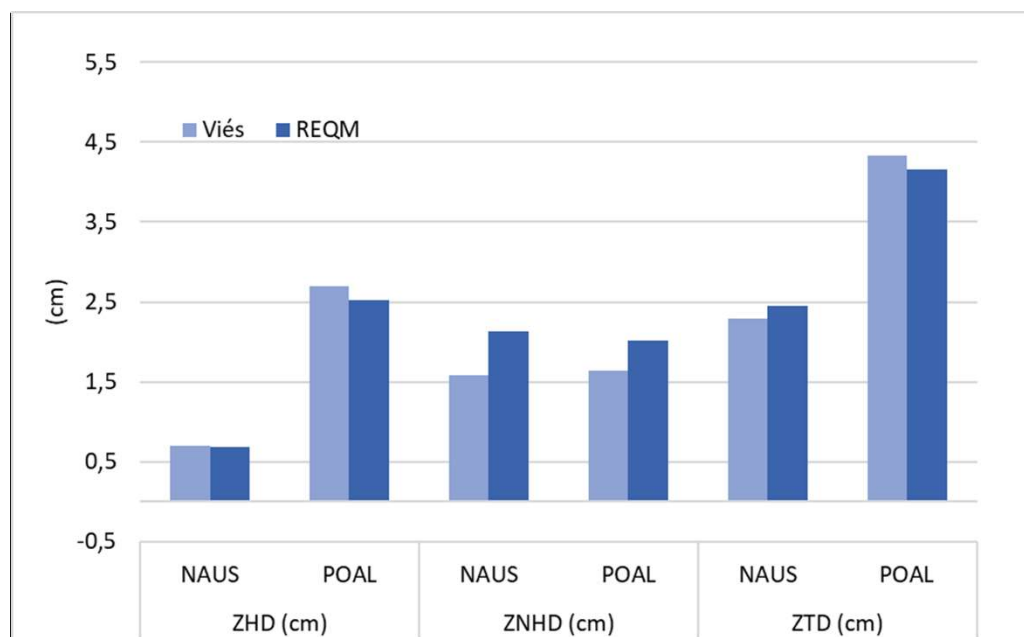




Tabela 3 - Síntese da análise do viés e da REQM do atraso zenital hidrostático (ZHD), do não hidrostático (ZNHD), e total (ZTD) em relação as estações NAUS e POAL.

	ZHD (cm)		ZNHD (cm)		ZTD (cm)	
	NAUS	POAL	NAUS	POAL	NAUS	POAL
Viés	0,71	2,69	1,59	1,64	2,29	4,33
REQM	0,69	2,52	2,14	2,02	2,44	4,16

Portanto, da Seção 5.1, é possível concluir que o atraso zenital obtido a partir da BMF/WRF tem REQM variando de 1,9 a 6,3 cm de acordo com a região (NAUS-CUIB-POLI-POAL) quanto à análise anual, e de 2,4 a 4,16 cm (NAUS-POAL) quanto à série semanal. A análise semanal apresenta a vantagem de obter o atraso a partir de alta resolução temporal (horária), visto que há uma variação, ao longo de um mesmo dia, de até 20 cm (POAL). Na próxima seção será realizada uma avaliação quanto ao atraso inclinado.

## 5.2 Avaliação da BMF na modelagem do atraso inclinado

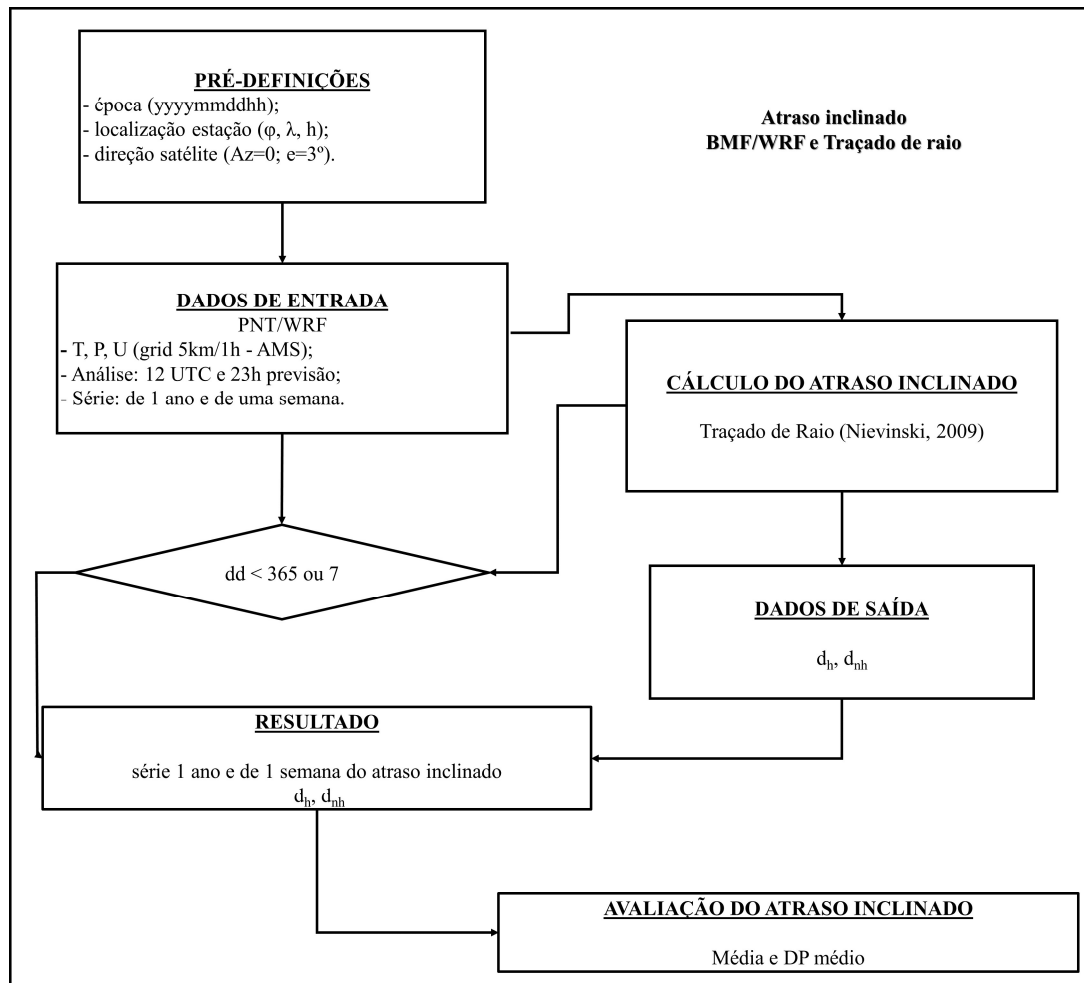
Nessa seção são apresentados os resultados e análises do atraso inclinado a partir da BMF/WRF. A metodologia aplicada é semelhante à proposta na Seção 5.1, com o diferencial de que essa avaliação é em relação ao atraso inclinado (e não zenital) e não há valores de referência, uma vez que o atraso inclinado não é facilmente modelado por um algoritmo, como foi possível com o atraso zenital com radiossondas (seção 5.1). Por essa razão, a avaliação se concentrará na variação do atraso inclinado e em indicar o quanto poderia se errar ao considerar um valor médio, que desconsidere a sazonalidade oriunda do clima brasileiro nos diferentes cenários que cada uma das estações analisadas apresentam.

No fluxograma da metodologia proposta nessa seção, (Figura 20), pode se destacar como principal diferença em relação à metodologia aplicada na Seção 5.1 que o ângulo de elevação é de 3°, ou seja, um baixo ângulo de elevação (próximo ao horizonte) utilizado na modelagem do atraso inclinado (BOEHM, 2003).

Em relação às duas estratégias apresentadas na Seção 5.1, o que diverge nessa seção também é apenas o uso do atraso inclinado. Os períodos analisados (série anual e semanal) têm as mesmas características (análises da série anual e das previsões horárias da série semanal), o que foi adotado de forma a manter a variação climatológica coerente em ambas avaliações (detalhes Seção 4.1 e Seção 5.1).



Figura 20 - Fluxograma da metodologia aplicada na avaliação do atraso inclinado pela BMF/WRF.



### 5.2.1 Resultados e análises da BMF na modelagem do atraso inclinado: série anual

A série anual do atraso inclinado não hidrostático para cada uma das estações avaliadas (NAUS-CUIB-POLI-POAL) é apresentada na Figura 21. O primeiro resultado a ser observado é que diferentemente do que é afirmado na literatura (seção 2.2) o atraso inclinado nas estações brasileiras analisadas é maior, superando as dez vezes do atraso zenital (Seção 5.1). Na Tabela 4 são apresentados (de forma generalizada) os valores máximos e mínimos em relação ao atraso inclinado e zenital, não hidrostático e total. Pode-se notar que em todas as estações e nas duas componentes (não hidrostática e total) o atraso na direção inclinada (*S - slant*) é quase ou mais que vinte vezes o valor do atraso zenital. Assim, a magnitude da razão do atraso inclinado e zenital, nas estações avaliadas, resulta em torno de quinze a vinte vezes maior.

Figura 21 - Série anual do atraso inclinado não hidrostático (SNHD) a partir da modelagem da BMF por estação.

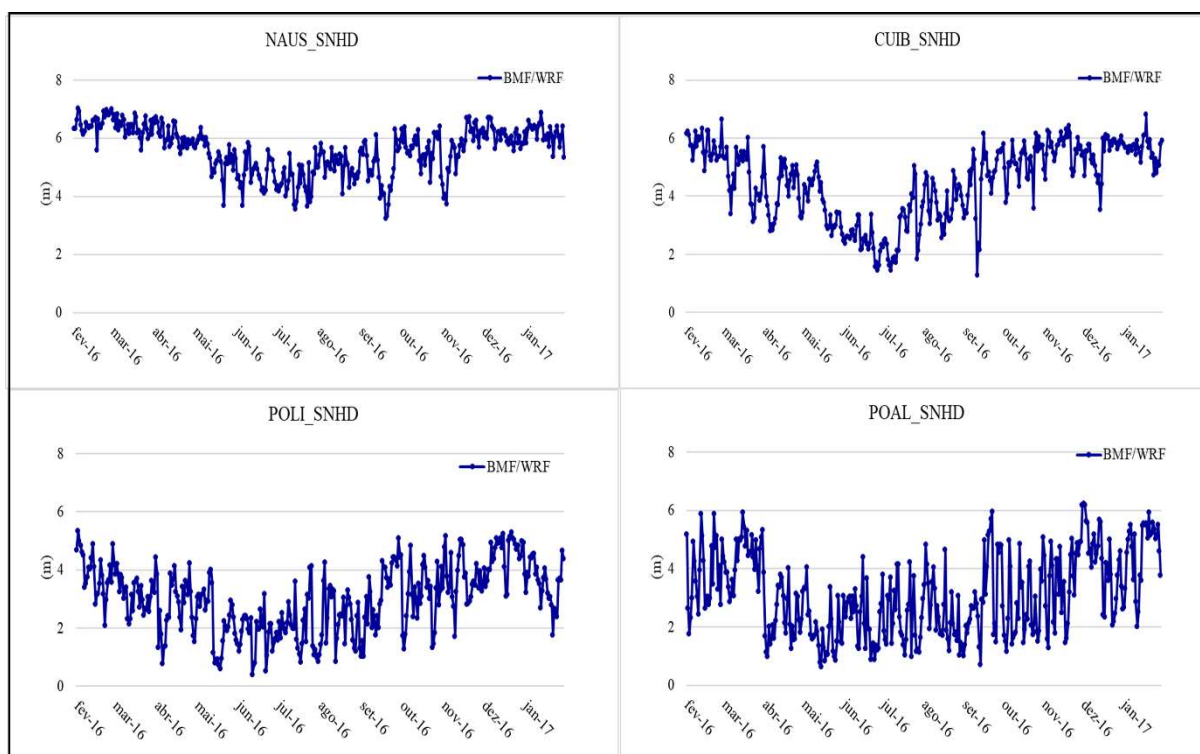


Tabela 4 - Síntese da análise da média do não hidrostático (SNHD), e total (STD) em relação às estações NAUS-CUIB-POLI-POAL.

SNHD x ZNHD (m)				
	NAUS	CUIB	POLI	POAL
ZNHD (max - min)	0,4 – 0,15	0,35 – 0,05	0,3 – 0,02	0,35 – 0,05
SNHD (max - min)	7,0 - 3,0	6,5 – 1,0	5,5 – 0,5	6,0 - 1,0
STD x ZTD (m)				
	NAUS	CUIB	POLI	POAL
ZTD (max - min)	2,7 – 2,5	2,65 – 2,3	2,45 – 2,15	2,6 – 2,3
STD (max - min)	43 - 39	42 - 36	39 - 33	42 – 37

Embora não seja possível realizar uma validação do atraso inclinado (por não ter uma referência a ser comparada) é possível realizar análises devido à característica dos resultados apresentados na Figura 21. Nota-se que o atraso inclinado não hidrostático apresenta variação anual (comportamento da série) igual ao apresentado na Figura 15 do atraso zenital; a diferença ocorre na magnitude. O que pode levar a supor que a qualidade do atraso inclinado não hidrostático seja semelhante (se não igual) à do atraso zenital (Seção 5.1.1). Essas considerações se estendem ao atraso inclinado total (Figura 22) em relação ao atraso zenital total (Figura 16).

A avaliação da série anual do atraso inclinado foi realizada em relação a sua média, ou seja, foi calculada a média da série anual (Equação (27)) e o desvio padrão (Equação 31). Embora o DP não represente a precisão do atraso inclinado pela BMF/WRF – visto que a série tem grande variação de acordo com a época do ano (de até 6 m) – pode indicar o quanto se erra ao considerar valores climatológicos globais na modelagem do atraso inclinado nessas estações avaliadas. O atraso inclinado hidrostático apresenta média de 35 a 32 m, o não hidrostático de no máximo 5,6 m (NAUS) e mínimo de 3,02 (POLI), o que se reflete no atraso total. A Figura 23 e a Tabela 5 apresentam que o DP atinge até a ordem métrica: valor máximo do DP de atraso inclinado total (STD) em CUIB 1,37 m e mínimo em NAUS de 88 cm. Esses resultados dão indícios de que ao considerar valores médios do atraso inclinado, considerando a realidade brasileira, pode resultar em prejuízos para a qualidade de sua modelagem em aplicações de posicionamento, por exemplo.

Figura 22 - Série anual do atraso inclinado total a partir da modelagem da BMF por estação

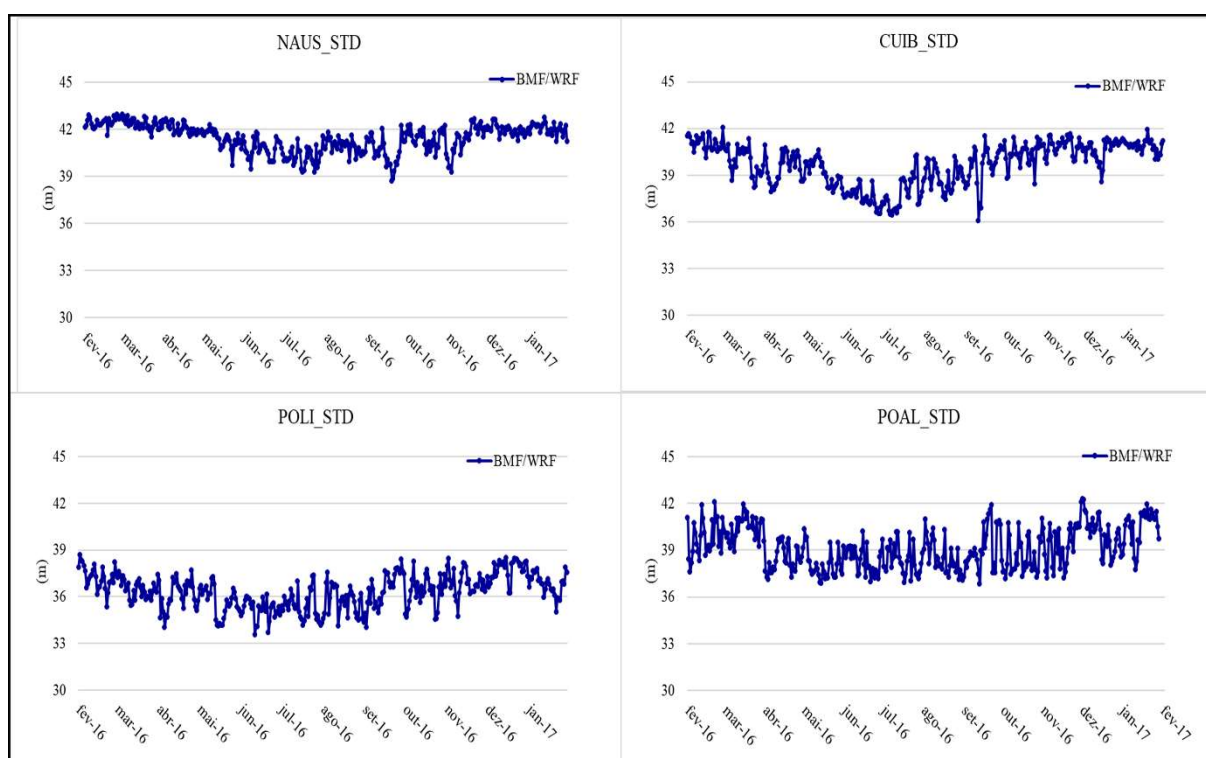


Figura 23 - Análise da média do atraso inclinado hidrostático (SHD), não hidrostático (SNHD), e total (STD) para as estações NAUS-CUIB-POLI\_POAL

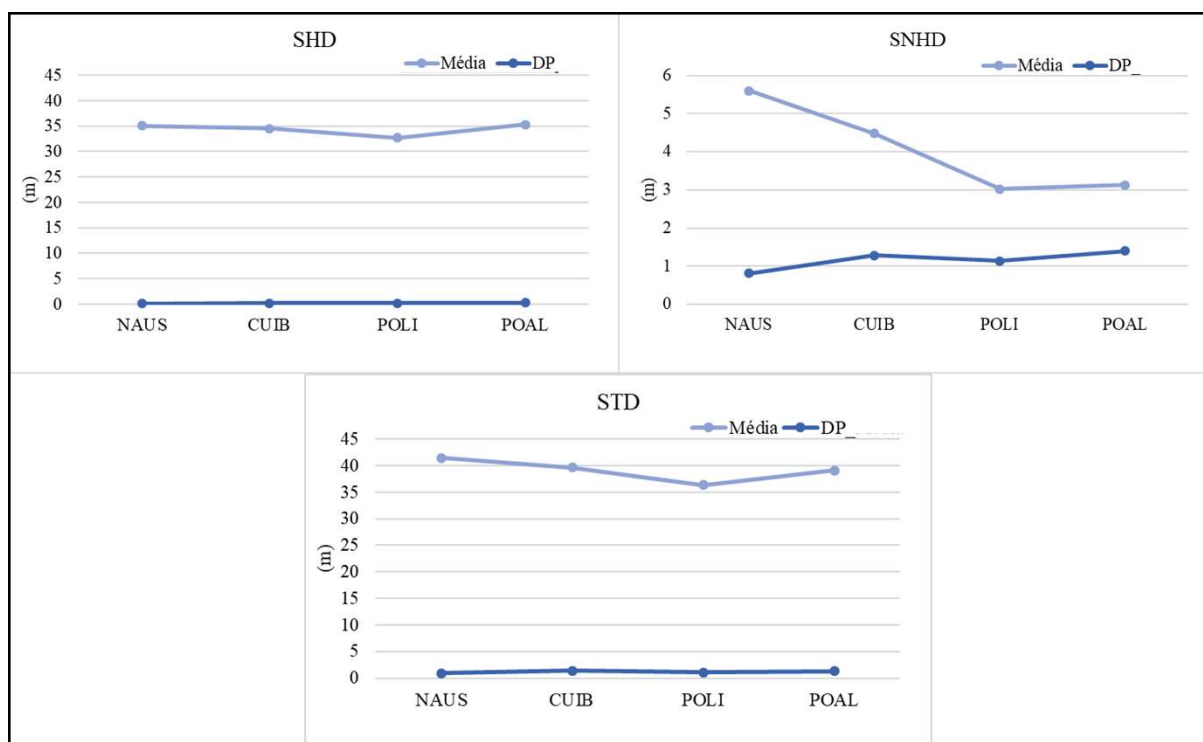


Tabela 5 - Síntese da análise da média e do DP do atraso inclinado hidrostático (SHD), do não hidrostático (SNHD), e total (STD) em relação as estações NAUS-CUIB-POLI\_POAL.

SHD				
	NAUS	CUIB	POLI	POAL
Média	35,06	34,46	32,71	35,29
DP	0,11	0,13	0,16	0,24
SNHD				
	NAUS	CUIB	POLI	POAL
Média	5,59	4,48	3,02	3,12
DP	0,81	1,28	1,14	1,40
STD				
	NAUS	CUIB	POLI	POAL
Média	41,46	39,67	36,33	39,11
DP	0,88	1,37	1,11	1,34

### 5.2.2 Resultados e análises da BMF na modelagem do atraso inclinado: série semanal

A série semanal do atraso inclinado visa apresentar a sua variabilidade ao longo das horas do dia e ao longo dos dias subsequentes. Na Seção 5.1.2 foi realizada uma avaliação da qualidade do atraso zenital, em relação à referência (radiosondas), de acordo com as previsões horárias do atraso. Nessa seção não será possível realizar a avaliação de qualidade

do atraso inclinado - como discutido na Seção 5.2.1 – mas uma discussão sobre magnitude e variação dos valores.

Na Seção 5.2 foi apresentada a metodologia aplicada no cálculo do atraso inclinado (Figura 20). Da mesma forma que na seção 5.1.2 o período utilizado foi de uma semana (27/2/16 a 5/3/16 - 23h/dia) que compreende o verão. As duas estações também foram mantidas (NAUS e POAL).

Na Figura 24 pode-se notar que o comportamento da série semanal do atraso zenital (Figura 18) é a mesma do atraso inclinado, o que pode indicar que a qualidade da modelagem do atraso inclinado e zenital sejam semelhantes. Os resultados mostram que a componente não hidrostática apresenta valores de três a quatro vezes maiores na estação NAUS (de 6 a 7,5m) do que na estação POAL (de 5,5 a 1,5m) em um mesmo dia (exemplo dia 29/2, ), sendo que as menores discrepâncias entre o atraso inclinado nessas estações é de 1m (exemplo dia 27/2). Embora a estação NAUS apresente os maiores valores do atraso ao longo da semana analisada, com máximo de 43,5 total e 8m não hidrostático, ela tem uma variação menor (cerca de 1,5m) do que na estação POAL, com variação diária superior a 3m (em 27/2) e semanal de até 3,5m. O atraso inclinado total segue a mesma análise que para o não hidrostático, sendo diferenciado apenas pela sua magnitude (NAUS de 43,5 a 41,5m e POAL 37,5 a 41m). As variações significativas do atraso inclinado na estação POAL podem, assim como no atraso zenital, ser especuladas com relação a variações da umidade. Na Seção 5.1 essas análises foram realizadas quanto ao atraso zenital. Análise semelhante pode ser realizada quanto ao atraso inclinado, uma vez que na estação POAL os valores do atraso não hidrostático (refletido no total) de 5,5m caem para 2,5 (dia 27/2) a 1m (dia 28), voltando a aumentar em 03/03, estando correlacionados com o aumento e diminuição da precipitação média (5,9 mm (27/2), 0mm (28/2) e 46,7mm (3/3)). Assim, a variação do atraso inclinado também tem forte correlação com a variação da umidade.

Os valores apresentados na Figura 25 mostram que, na média, o atraso hidrostático é semelhante em ambas estações, como pode ser observado na Tabela 6 (NAUS – 34,92 m e POAL 35,12 m). Já o não hidrostático na estação NAUS (6,63m) é quase duas vezes maior que em POAL (3,47 m). O desvio padrão tem os menores valores na componente hidrostática, sendo em NAUS 13 cm e POAL 16 cm. Na componente não hidrostática o desvio atinge até 1,05 m (POAL). Logo, o uso de valores médios para o atraso inclinado pode resultar em altos erros finais.

Figura 24 - Série semanal do atraso inclinado não hidrostático e total a partir da modelagem da BMF/WRF das estações NAUS e POAL.

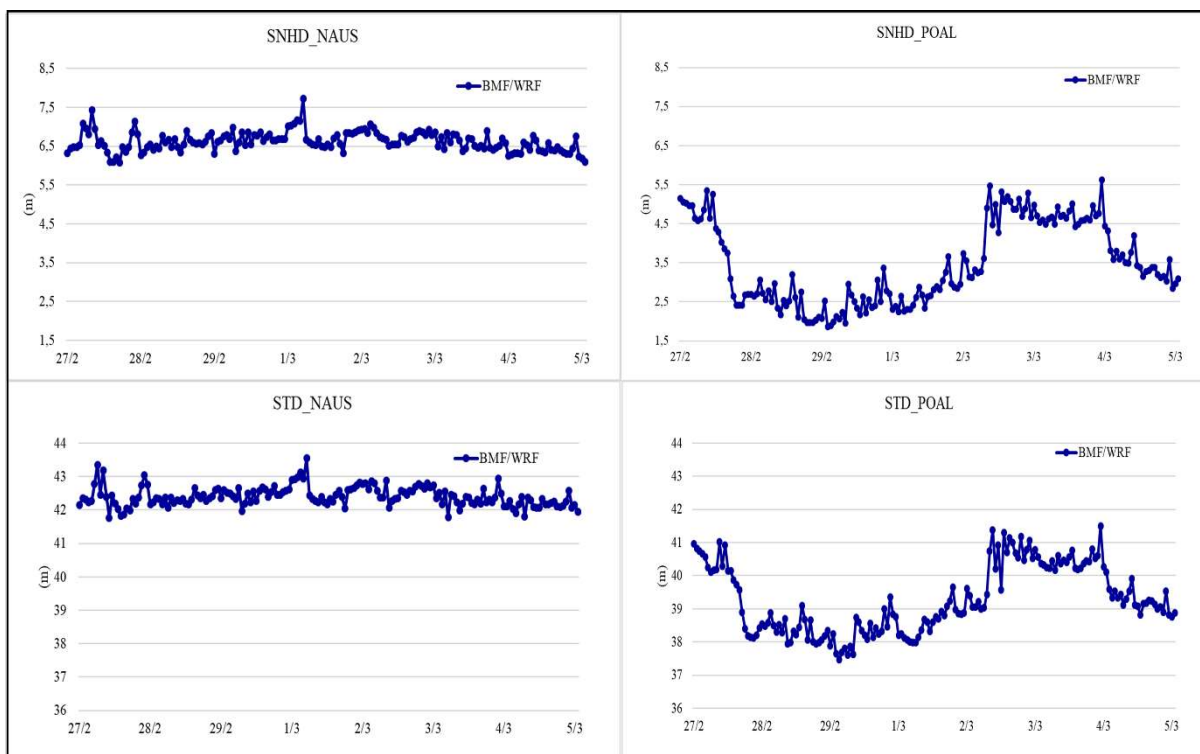


Figura 25 - Análise da média e do DP do atraso zenital hidrostático (SHD), não hidrostático (SNHD), e total (STD) para as estações NAUS e POAL.

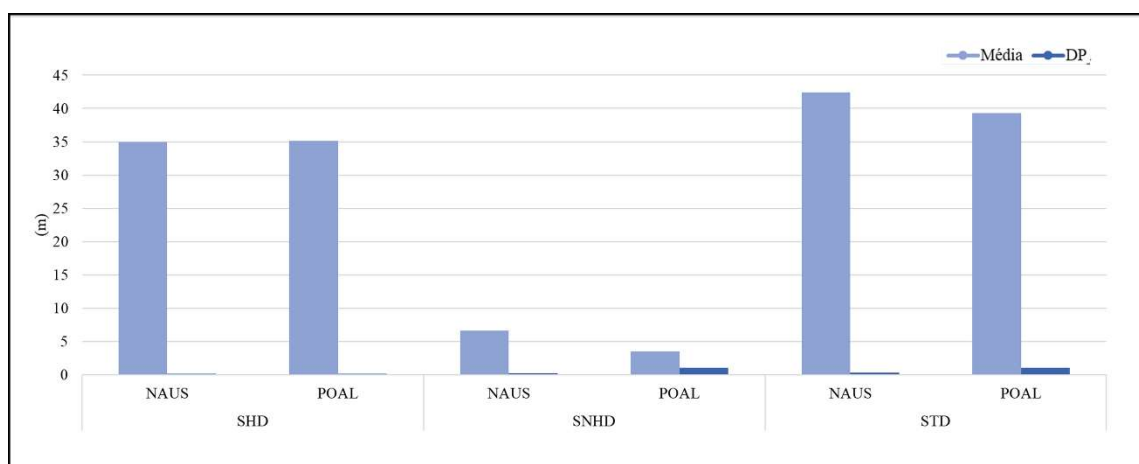


Tabela 6 - Síntese da análise da média e do DP do atraso zenital hidrostático (SHD), do não hidrostático (SNHD), e total (STD) em relação as estações NAUS e POAL.

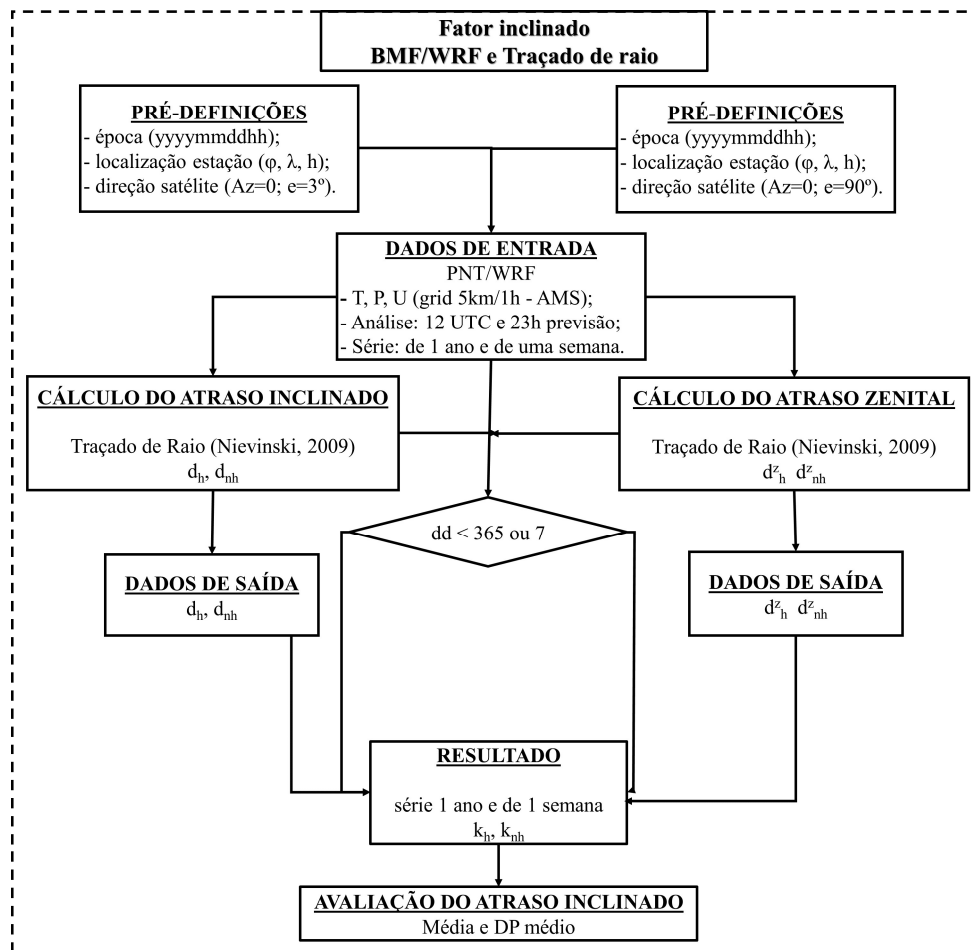
	SHD (cm)		SNHD (cm)		STD (cm)	
	NAUS	POAL	NAUS	POAL	NAUS	POAL
Média	34,92	35,12	6,63	3,47	42,41	39,28
DP	0,13	0,16	0,25	1,05	0,29	1,02

Portanto, na seção 5.2 pode-se concluir que, embora na análise do atraso inclinado não seja possível avaliar a qualidade desse atraso (por ausência de referência) obtido pela metodologia proposta nessa tese (BMF/WRF), pode-se especular que essa qualidade seja semelhante (se não a mesma) que a apresentada pelo atraso zenital (Seção 5.1.1). Outro resultado significativo foi que as avaliações quanto ao atraso mostraram que esse apresenta concordância - em relação à respectiva época - com as variações de precipitação e umidade relativa. Na seção 5.3 são apresentados os resultados do fator inclinado.

### **5.3 Avaliação da BMF na modelagem do fator inclinado**

O fator inclinado é a razão entre o atraso inclinado e o atraso zenital (Equações 21 e 22 - Seção 3.3) (NIEVINSKI, 2009), ou seja, um coeficiente adimensional. Na Figura 26 é apresentado o fluxograma para a determinação do fator inclinado, que considera as metodologias propostas na Seção 5.1 que trata da determinação do atraso zenital e Seção 5.2 referentes ao atraso inclinado, ou seja, o fator inclinado foi determinado para as mesmas épocas e estações. Nas Seções 5.3.1 e 5.3.2 são apresentados os resultados do fator inclinado em período e estações concomitantes aos apresentados no Capítulo 4 e Seção 5.2.

Figura 26 - Fluxograma da metodologia aplicada na avaliação do fator inclinado pela BMF/WRF.



### 5.3.1 Resultados e análises da BMF na modelagem do fator inclinado: série anual

A metodologia para o cálculo da série anual do fator inclinado é apresentada na Seção 5.3. O fator inclinado não hidrostático (FINH) das estações avaliadas (NAUS-CUIB-POLI-POAL) é apresentado na Figura 27. Pode-se notar que na estação NAUS o fator inclinado apresenta valores máximos de 18 e mínimos de 17,5, com maior variação de maio a outubro. Na estação CUIB a amplitude de variação é maior, em torno de uma unidade, principalmente de março a setembro. POLI tem valores de FINH superiores a 18, com variação superior a 1,5 em praticamente todo o período. Na estação POAL a variabilidade do FINH é semelhante à da estação POLI, porém apresenta dois valores discrepantes aos demais, como por exemplo no dia 27/4.

Na Figura 28 é apresentada uma análise da correlação entre os atrasos não hidrostático (em metros), inclinado (SNHD) e zenital (ZNHD), e da chuva acumulada (precipitação em milímetros) em relação ao fator inclinado não hidrostático para a estação



POAL. Para a análise, além do dia 27/4, foram selecionados o dia anterior (26/4) e posterior (28/4), com o objetivo de tecer discussões sobre o que possa ter ocorrido no dia 27/4. A partir da Figura 28 é possível verificar que a quantidade média de chuva no dia 26/4 foi de 27mm, de 8,4mm no dia 27/4 e 0mm no dia 28/4, o que não justifica a diminuição do fator inclinado no dia 27/4 e aumento no dia 28/4. O atraso inclinado apresenta correlação direta entre o seu decréscimo e a diminuição do volume de chuva (27mm-3,87m; 8,4mm-1,68m; 0mm-1,12m) como já discutido na Seção 5.2.2. A diminuição do atraso inclinado e do atraso zenital, em conjunto, pode resultar na diminuição do fator inclinado, pois quanto menor o atraso zenital (denominador) maior razão entre eles, considerando o numerador constante. Por exemplo, supondo o atraso inclinado 3,87 e o zenital decrescente (0,22-0,11-0,06) o fator inclinado seria crescente:  $3,87/0,22=17,6$ ;  $3,87/0,11=35,2$ ;  $3,87/0,06=64,5$ .

Figura 27 -Série anual do fator inclinado não hidrostático da BMF por estação.

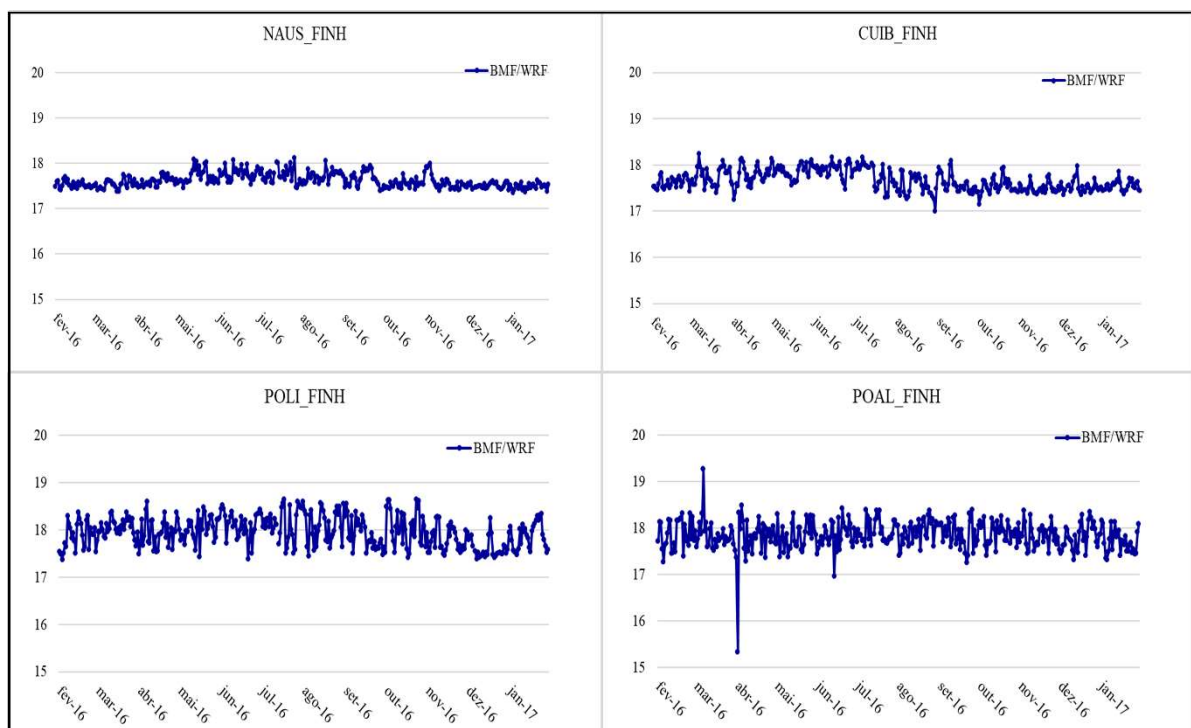
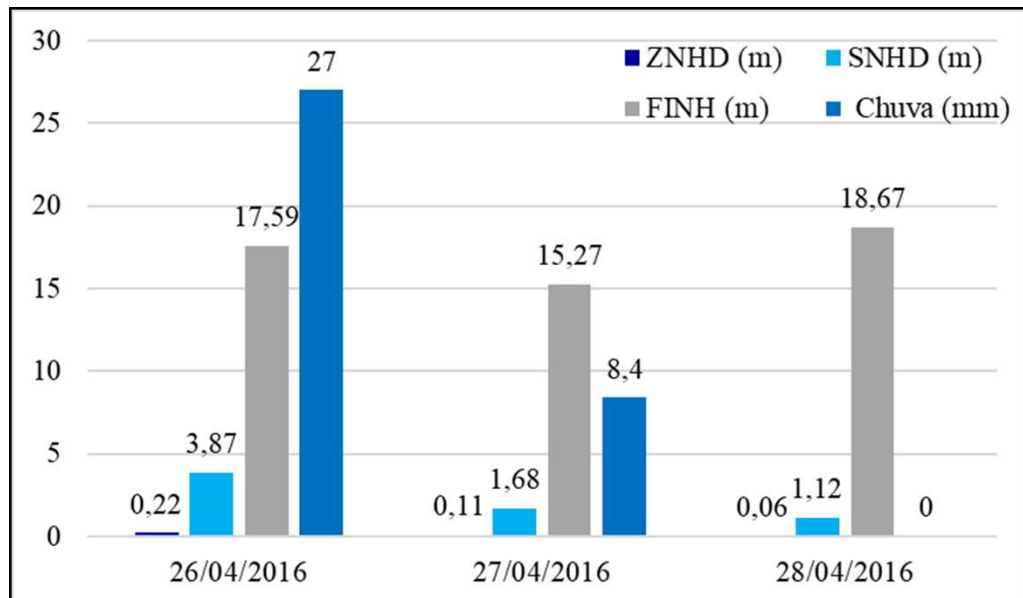
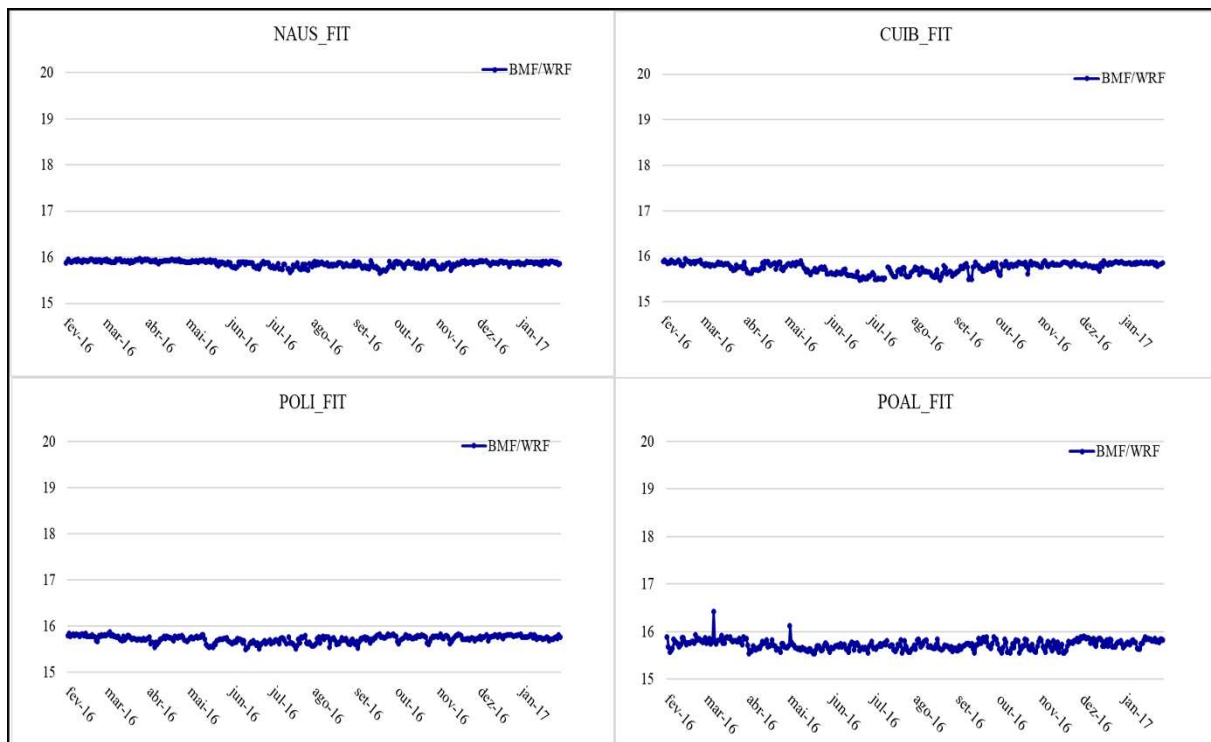


Figura 28 - Análise da correlação do atraso não hidrostático inclinado (SNHD) e zenital (ZNHD) em relação ao fator inclinado não hidrostático e à chuva para o dia 27/4/16 POAL.



O fator inclinado total (FIT) (Figura 29) não apresenta variação significativa entre as estações analisadas (NAUS, CUIB, POLI e POAL). Em todas as estações o fator inclinado total apresenta valores de 16 a 16,5, a menos dos valores discrepantes em POAL, que já foram discutidos.

Figura 29 - Série anual do fator inclinado total a partir da modelagem da BMF por estação



A partir da média dos valores do fator inclinado (hidrostático- FIH; não hidrostático- FINH; e total FIT), apresentados na Figura 30 e Tabela 7, pode-se notar que os maiores valores são do fator inclinado não hidrostático, e que a média dos valores mais uma vez não representa a real variabilidade dos valores do fator inclinado na série anual e ainda apresenta valores muito semelhantes para todas as estações analisadas. Na Tabela 7 é apresentada uma média de toda a série por estação. Pode-se notar que a média das quatro estações: do fator hidrostático, de 15,6; do não hidrostático, de 17,8; e total de 15,8. Nota-se que o fator inclinado não apresenta mesmo padrão de magnitude que o atraso zenital ou inclinado, pois como pode ser observado o fator inclinado não hidrostático é maior que o total. O que pode ser explicado pela magnitude do atraso zenital, por exemplo: se  $SNHD = 6,5$  e  $ZNHD = 0,37$ , o FINH será 17,56 – o total seria  $STD = 42,4$  e  $ZTD = 2,7$ , o FIT será 15,7. Na próxima seção é apresentada uma análise do fator inclinado semanal, considerando valores de atraso zenital e inclinado horário.

Figura 30 - Análise da média do fator inclinado hidrostático (FIH), não hidrostático (FINH), e total (FIT) para as estações NAUS-CUIB-POLI-POAL.

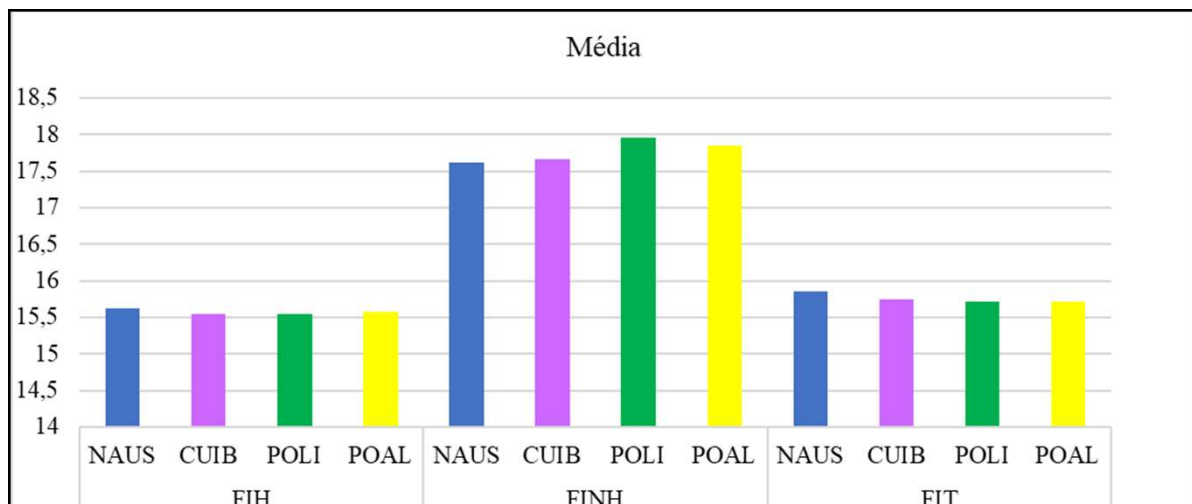


Tabela 7 - Síntese da análise da média do fator inclinado hidrostático (FIH), do não hidrostático (FINH), e total (FIT) em relação às estações NAUS-CUIB-POLI-POAL

FIH				FINH				FIT			
NAUS	CUIB	POLI	POAL	NAUS	CUIB	POLI	POAL	NAUS	CUIB	POLI	POAL
15,62	15,54	15,54	15,57	17,61	17,66	17,95	17,84	15,86	15,75	15,71	15,72

### 5.3.2 Resultados e análises da BMF na modelagem do fator inclinado: série semanal

Na Seção 5.3.1 foi apresentada a metodologia proposta para a determinação da série semanal do fator inclinado. As séries semanais do fator inclinado não hidrostático e

total, na Figura 31, apresentam resultados que concordam com as análises da Seção 5.3.1, ou seja, NAUS apresenta valores que não excedem 18 e POAL apresenta uma maior variação dos valores de fator inclinado não hidrostático, de 17 a 18 em média, mas alguns excedem esse valor. O fator inclinado total na estação NAUS é muito próximo a 16; já a estação POAL tem valores menores, entre 15,5 a 15,9.

A média dos fatores inclinados semanais (Figura 32 e Tabela 8) nas três componentes, hidrostática, não hidrostática e total, 15,6, 17,7 e 15,8, respectivamente, apresenta valores semelhantes às médias anuais.

Figura 31 - Série semanal do fator inclinado não hidrostático e total a partir da modelagem da BMF/WRF das estações NAUS e POAL.

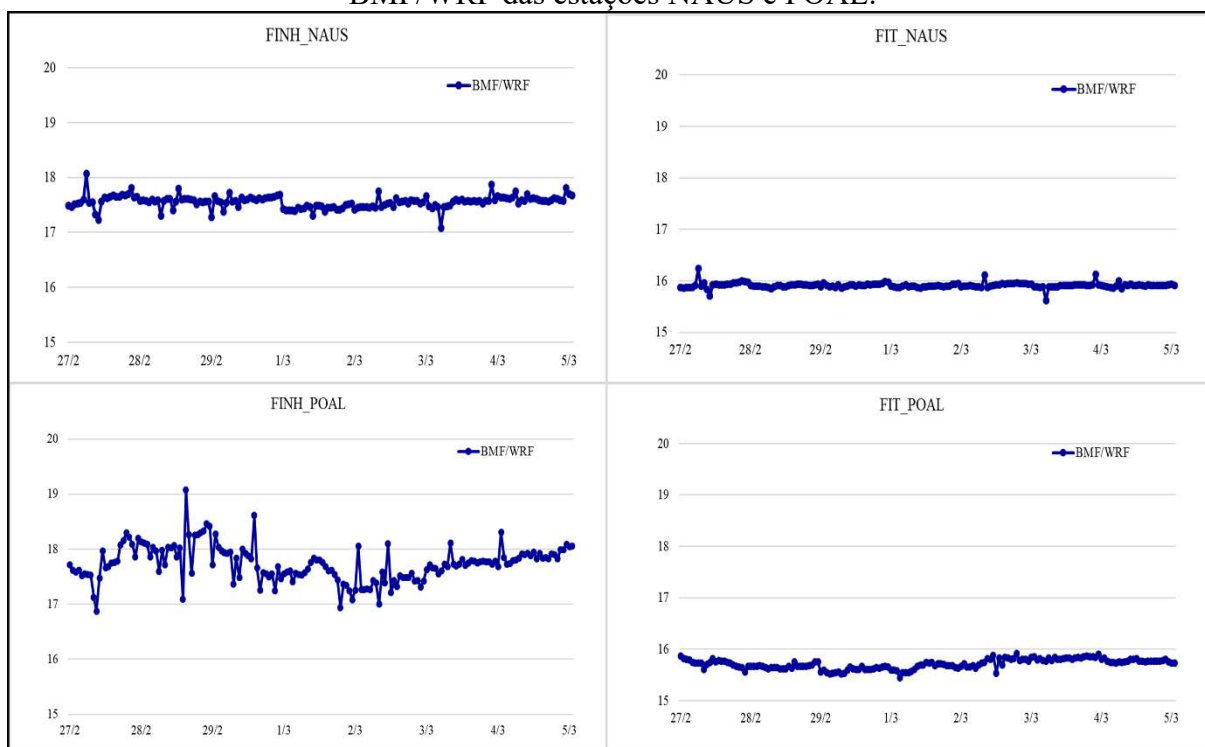


Figura 32 - Análise da média do fator inclinado hidrostático (FIH), não hidrostático (FINH), e total (FIT) para as estações NAUS e POAL.

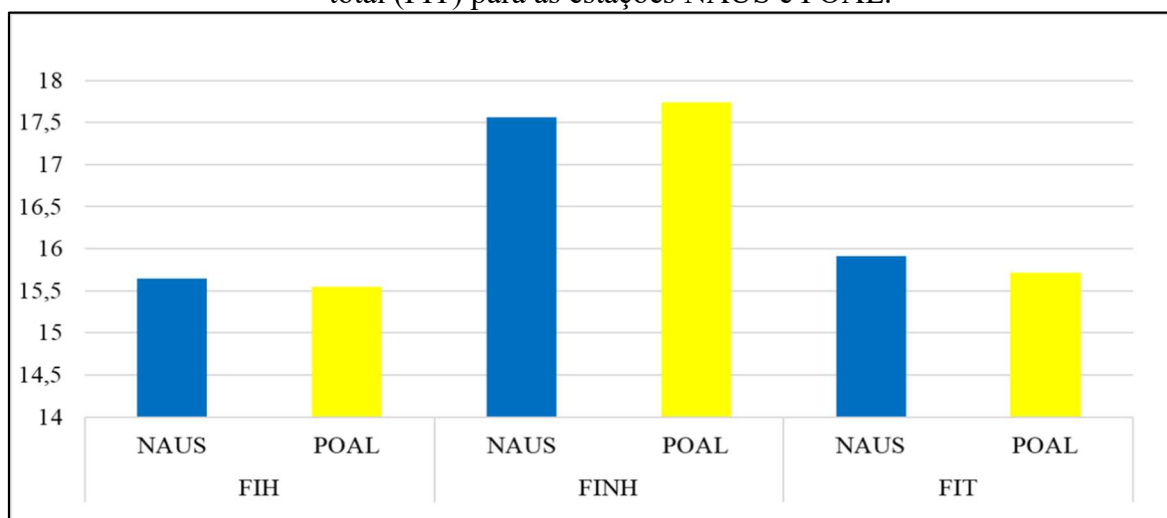


Tabela 8 - Síntese da análise da média do atraso inclinado hidrostático (FIH), do não hidrostático (FINH), e total (FIT) em relação às estações NAUS-POAL

FIH		FINH		FIT	
NAUS	POAL	NAUS	POAL	NAUS	POAL
15,64	15,55	17,56	17,74	15,91	15,71

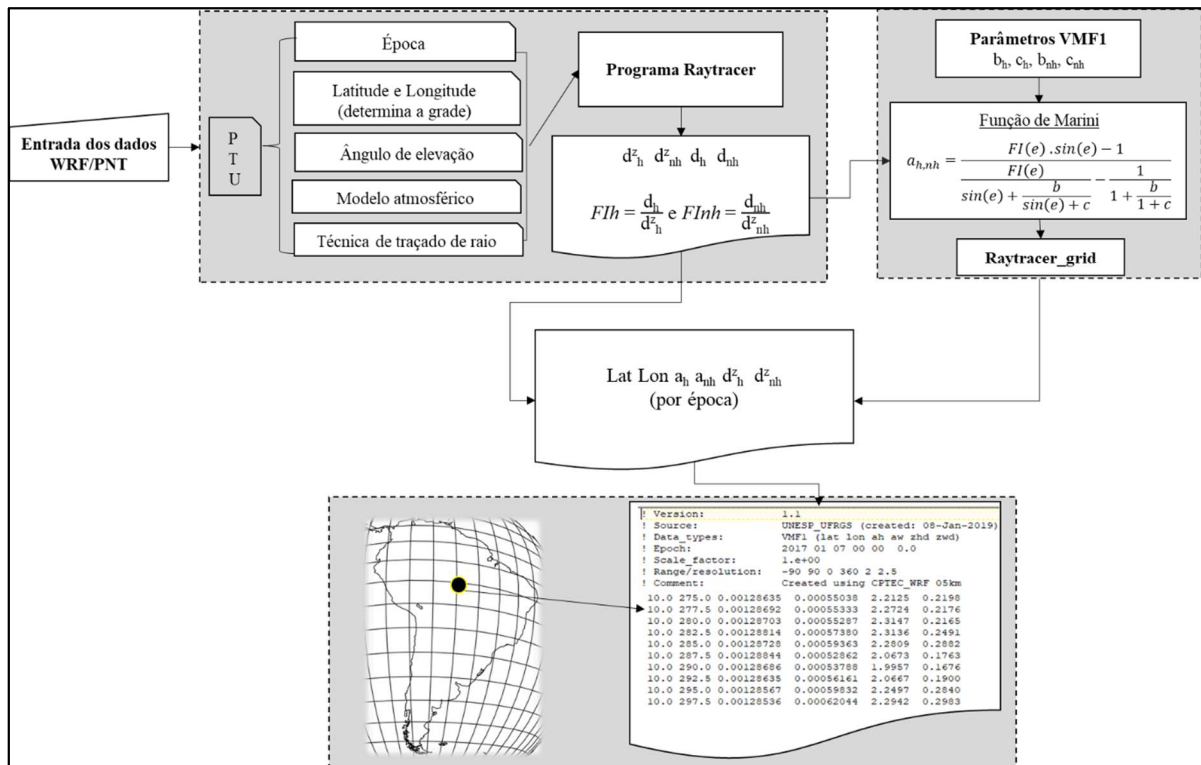
Os principais resultados da seção 5.3 são a menor magnitude e variabilidade do fator inclinado, uma vez que esse é calculado em razão dos dois atrasos (inclinado e zenital) altamente variáveis, tanto ao longo da série anual quanto da série semanal. Outro resultado a ser destacado foi a correlação entre o aumento do fator inclinado e a diminuição dos atrasos, inclinado e zenital. Valores discrepantes na série, principalmente observado na estação POAL (Figuras 27, 29, 31), devem ser investigados.

#### 5.4 Grade da BMF para a América do Sul

No Capítulo 4, segunda etapa (Figura 13), foi apresentada a metodologia aplicada no desenvolvimento da grade da BMF. Na Figura 33 é apresentado o fluxograma para o desenvolvimento da grade, onde pode ser verificado que após o cálculo do atraso zenital e inclinado (detalhes Seção 5.1 e Seção 5.2) é calculado o fator inclinado (Seção 5.3), que aplicado à função de Marini (Equação 19), resulta na obtenção do parâmetro  $a$  da BMF - considerando os parâmetros  $b$  e  $c$  (constantes) obtidos da VMF1. O cálculo do atraso zenital ( $d_{z_h}^z$ ,  $d_{z_{nh}}^z$ ) e parâmetro  $a$ , hidrostáticos e não hidrostáticos ( $a_h$ ,  $a_{nh}$ ), é realizado para toda a grade

(raytracer\_grid). A BMF considera a América do Sul, com a mesma resolução do WRF/PNT, ou seja, resolução espacial de 5km e temporal de 1 hora.

Figura 33 - Fluxograma da metodologia aplicada no desenvolvimento da grade da BMF.



Como resultado dessa metodologia foi gerada a função BMF que permite realizar interpolação para qualquer ponto da grade e época. Na Figura 34 é apresentado um exemplo de arquivo da BMF que é organizado em diretórios com o dia a que se refere (no exemplo 07/01/2017), com as 24 épocas de previsão a partir de uma análise (12h UTC). Cada arquivo contém os valores do atraso zenital e parâmetro  $a$  em cada ponto da grade com latitude e longitude pré-estabelecidos, para o cálculo da função de mapeamento. Os arquivos, com 1 hora de previsão totalizam 449KB, perfazendo em torno de 10,5GB por dia para toda a grade. O tempo de processamento para cada época tem duração de 5min aproximadamente, ou seja, 2h por dia e 14h por semana. Esse tempo de processamento foi calculado considerando o computador de alto desempenho utilizado no desenvolvimento dessa tese (como citado na Seção 4.1.1), algo que para usuários de produtos para a modelagem do atraso de propagação poderia representar limitações. Nesse sentido, a disponibilização de arquivos da BMF representa uma vantagem para as aplicações, como no posicionamento GNSS (resultados serão apresentados no próximo capítulo).

Figura 34 - Exemplo dos arquivos da BMF para um dia e 24 épocas.

Diretórios: YYYYMMDD  
20170107

Nome	Data de modificaç...	Tipo	Tamanho
BRAZVMF2_20170107.H00	11/02/2019 23:24	Arquivo H00	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H01	11/02/2019 23:24	Arquivo H01	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H02	11/02/2019 23:24	Arquivo H02	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H03	11/02/2019 23:24	Arquivo H03	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H04	11/02/2019 23:24	Arquivo H04	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H05	11/02/2019 23:24	Arquivo H05	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H06	11/02/2019 23:24	Arquivo H06	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H07	11/02/2019 23:24	Arquivo H07	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H08	11/02/2019 23:24	Arquivo H08	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H09	11/02/2019 23:24	Arquivo H09	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H10	11/02/2019 23:24	Arquivo H10	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H11	11/02/2019 23:24	Arquivo H11	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H12	11/02/2019 23:24	Arquivo H12	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H13	11/02/2019 23:24	Arquivo H13	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H14	11/02/2019 23:24	Arquivo H14	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H15	11/02/2019 23:24	Arquivo H15	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H16	11/02/2019 23:24	Arquivo H16	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H17	11/02/2019 23:24	Arquivo H17	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H18	11/02/2019 23:24	Arquivo H18	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H19	11/02/2019 23:24	Arquivo H19	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H20	11/02/2019 23:24	Arquivo H20	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H21	11/02/2019 23:24	Arquivo H21	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H22	11/02/2019 23:24	Arquivo H22	449 KB
BRAZVMF2_20170107.H23	11/02/2019 23:24	Arquivo H23	449 KB

```

! Version: 1.1
! Source: UNESP UFRGS (created: 08-Jan-2019)
! Data types: VMF1 (lat lon ah aw zhd zwd)
! Epoch: 2017 01 07 00 00 0.0
! Scale_factor: 1.e+00
! Range/resolution: -90 90 0 360 2 2.5
! Comment: Created using CPTEC_WRF 05km
10.0 275.0 0.00128635 0.00055038 2.2125 0.2198
10.0 277.5 0.00128692 0.00055333 2.2724 0.2176
10.0 280.0 0.00128703 0.00055287 2.3147 0.2165
10.0 282.5 0.00128814 0.00057380 2.3136 0.2491
10.0 285.0 0.00128728 0.00059363 2.2809 0.2882
10.0 287.5 0.00128844 0.00052862 2.0673 0.1763
10.0 290.0 0.00128686 0.00053788 1.9957 0.1676
10.0 292.5 0.00128635 0.00056161 2.0667 0.1900
10.0 295.0 0.00128567 0.00059832 2.2497 0.2840
10.0 297.5 0.00128536 0.00062044 2.2942 0.2983

```



## 6. METODOLOGIA, EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES DA BMF NO PPP

### 6.1 Metodologia de avaliação da BMF no PPP

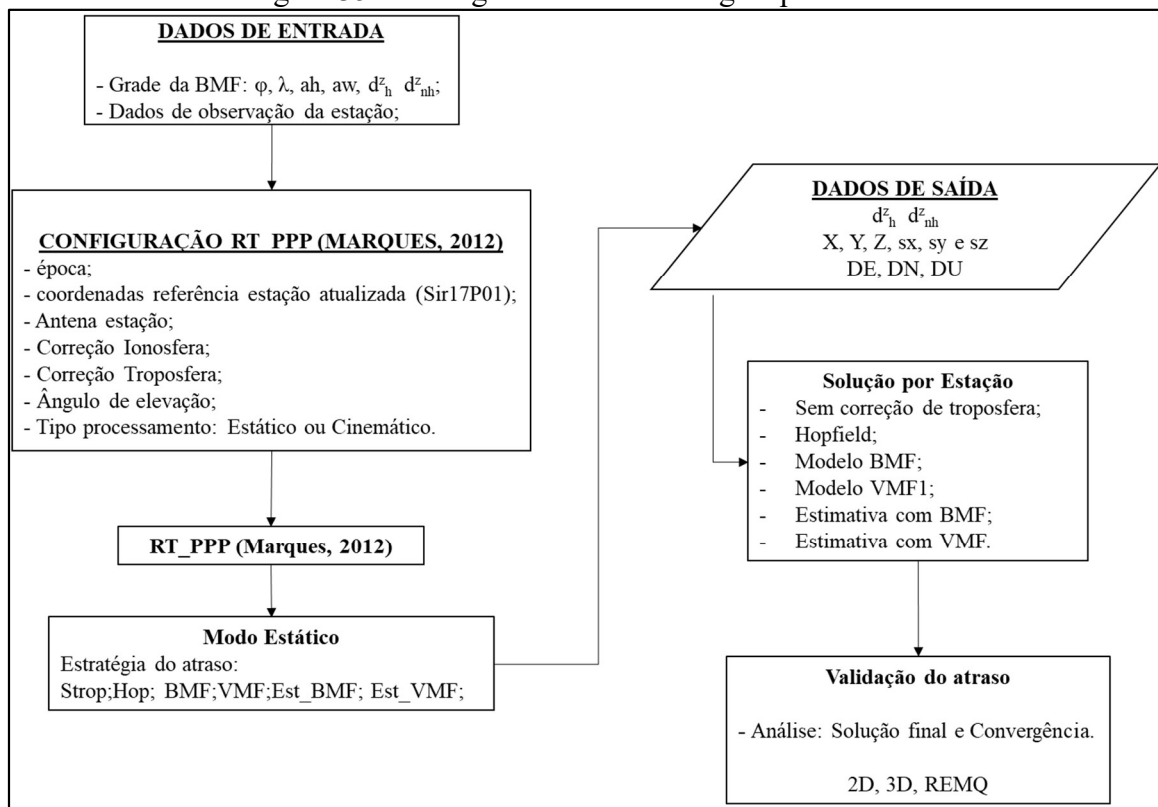
Após a modelagem e avaliação do atraso e dos parâmetros da função de mapeamento (capítulo 5), se faz necessária uma avaliação da qualidade da função proposta nessa tese, a BMF, para fins operacionais. A avaliação da qualidade da BMF é possível de ser realizada ao aplicá-la na eliminação do atraso nas observações GNSS em um método de posicionamento. O PPP é o mais indicado, uma vez que não há eliminação de partes dos efeitos tais como num método de posicionamento relativo (MONICO, 2008). Para realizar o PPP foi utilizado o software RT\_PPP desenvolvido por Marques (2012), com modificações (realizadas pelo autor) para leitura e processamento dessa nova função de mapeamento. Na figura 35 é apresentado o fluxograma da metodologia aplicada na realização do PPP. Os resultados apresentados na seção 5.4 foram um dos dados de entrada para o processamento no RT\_PPP, assim como os dados de: observação; órbitas; correções dos relógios; etc. As estações selecionadas foram NAUS e POAL, devido à qualidade das mesmas e apresentadas na seção 5.1, quando comparadas com os dados de referência (as radiossondas). De acordo com a climatologia apresentada na seção 4.2 o período de maior umidade ocorre em janeiro. Por essa razão foi selecionada uma data em janeiro de 2017 (07 de janeiro de 2017) para realização dos processamentos.

As coordenadas de referência das estações foram obtidas a partir das soluções semanais da Rede de monitoramento contínuo do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS-CON), que fornecem as coordenadas das estações (disponíveis em: <ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/>). A solução utilizada foi a SIR17P1930, da semana GPS 1930 para o dia do processamento (07/01/17), solução que está alinhada ao IGS08.

A estratégia de processamento foi o modo estático utilizando os diferentes modelos implementados, mas principalmente a função proposta nessa tese (BMF) e a função VMF1, que representam o estado da arte. Quando os dados das funções BMF e VMF1 são utilizados no posicionamento a cada época (a cada 1h BMF e a cada 6h o VMF1), ficam denominados nas análises como modelos BMF e VMF1. Mas, ao utilizar esses modelos como valores a priori nas estimativas, esses são denominados estimativa BMF (Est\_BMF) e estimativa VMF1 (Est\_VMF), para facilitar as descrições o modelo VMF1 será denominado VMF ao longo dos resultados.



Figura 35 - Fluxograma da metodologia aplicada no PPP



### 6.1.1 Avaliação da BMF no PPP estático: diferentes modelagens do atraso

Um experimento realizado foi em relação à estação NAUS e POAL; as estações que apresentaram os maiores valores do atraso. Esse experimento foi realizado no modo estático para o dia 07/01/17 (24h de dados). As estratégias para cálculo do atraso foram: realizar o PPP sem considerar nenhum modelo para modelar o atraso (situação hipotética); aplicar o modelo de teórico de Hopfield (com modelo de temperatura e pressão do GPT); utilizar a VMF1 (4 arquivos diários, grade global - interpolação temporal e espacial); empregar a BMF (24 arquivos diários, grade regional - interpolação temporal e espacial); estimar o atraso com as funções VMF1 e BMF (a componente não hidrostática é estimada e a hidrostática obtida pela VMF1 ou BMF) (MARQUES, 2012). Para cada uma das estratégias o RT\_PPP apresenta um resultado de posicionamento.

Na Figura 36 é apresentada a discrepância dos resultados obtidos no PPP no modo estático para a estação NAUS. O processamento sem considerar a modelagem do atraso (S\_Trop) e a partir do Hopfield foram retirados desse gráfico, pois apresentaram valores muito altos, ou seja, 8 m e 56 cm em altimetria (U - up), respectivamente, o que prejudicaria a visualização dos demais. As duas últimas estratégias citadas, onde o atraso é estimado no PPP,

apresentaram os melhores resultados, ou seja, as funções BMF e VMF. Na Figura 37 é apresentada a acurácia, ou seja, além da discrepância (Equação (28)) é considerado também o desvio padrão (Equação (31)) de cada componente. O modelo BMF apresentou acurácia de 10 cm em altimetria (U), qualidade inferior ao da VMF (5 cm). Já utilizando a estratégia de estimativa do atraso, o modelo BMF (Est\_BMF) apresentou acurácia de 0,6 cm, enquanto com a VMF (Est\_VMF) a acurácia foi de 0,9 cm, ou seja, Est\_BMF obteve 44% de melhoria (0,3 cm).

Figura 36 - PPP estático na estação NAUS considerando todas as estratégias no cálculo do atraso (VMF, BMF, Est\_VMF e Est\_BMF) para o dia 07/01/17

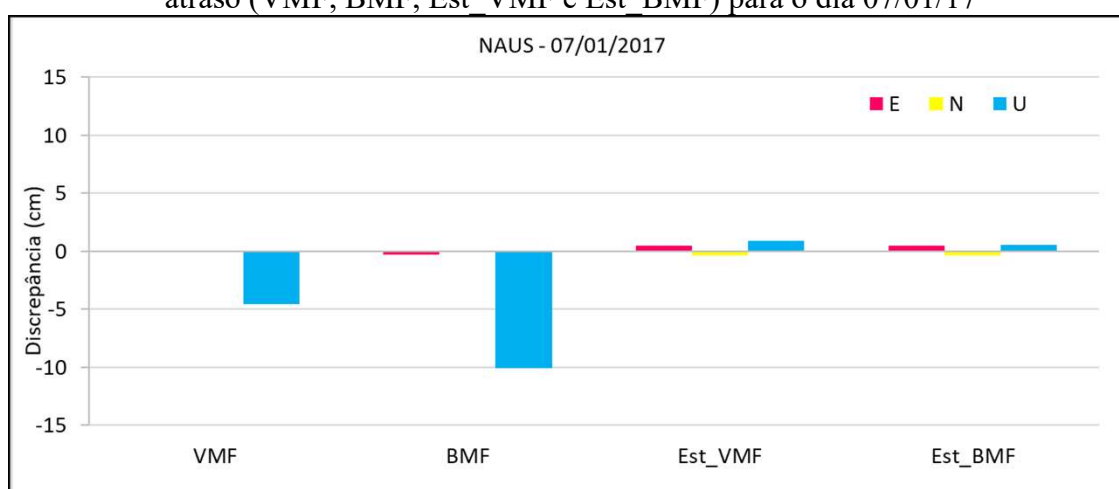
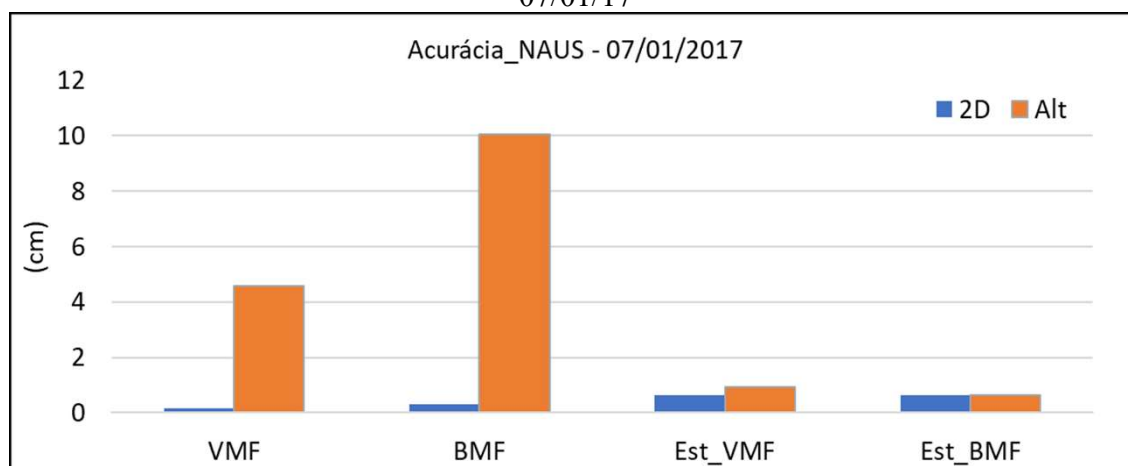


Figura 37 - Acurácia 2D e altimétrica (Alt) do PPP estático na estação NAUS considerando todas as estratégias no cálculo do atraso (VMF, BMF, Est\_VMF e Est\_BMF) para o dia 07/01/17



Diferentemente do que ocorreu na estação NAUS, na estação POAL a diferença entre os resultados obtidos como os modelos BMF e VMF são inferiores a 0,5 cm, mas as discrepâncias são maiores em relação à coordenada considerada verdadeira. A acurácia obtida no PPP para os dados da estação POAL (Figura 39) em relação a componente 2D são

semelhantes, 0,75 nos modelos BMF e VMF, 1,1 cm com as estimativas. Em relação a altitude a acurácia foi em torno de 16 cm para os modelos VMF e BMF (BMF 0,6 cm maior). Ao considerar a estimativa do atraso, os modelos VMF e BMF apresentam-se semelhantes (BMF cerca de 0,25 cm maior).

Figura 38 - PPP estático na estação POAL considerando todas as estratégias no cálculo do atraso (VMF, BMF, Est\_VMf e Est\_BMF) para o dia 07/01/17

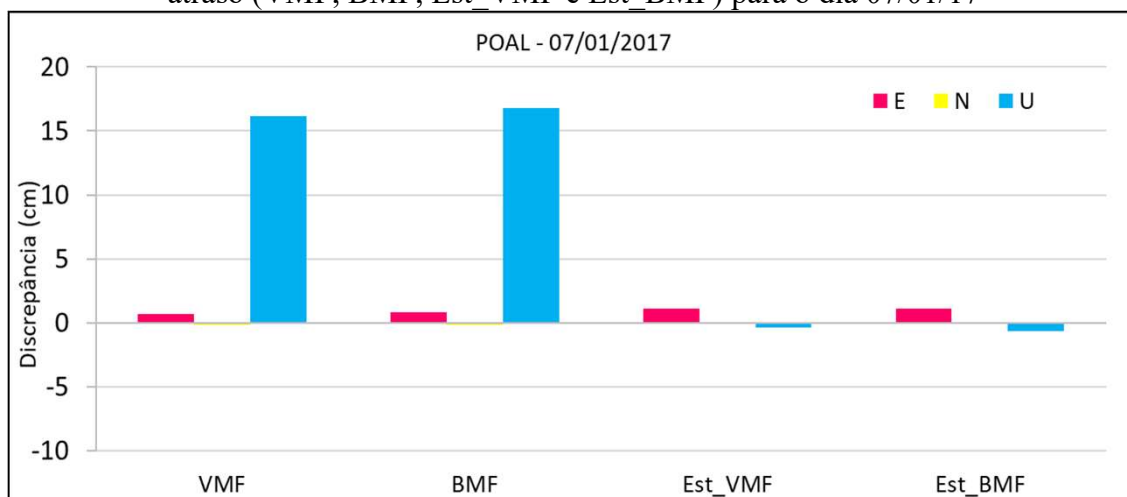
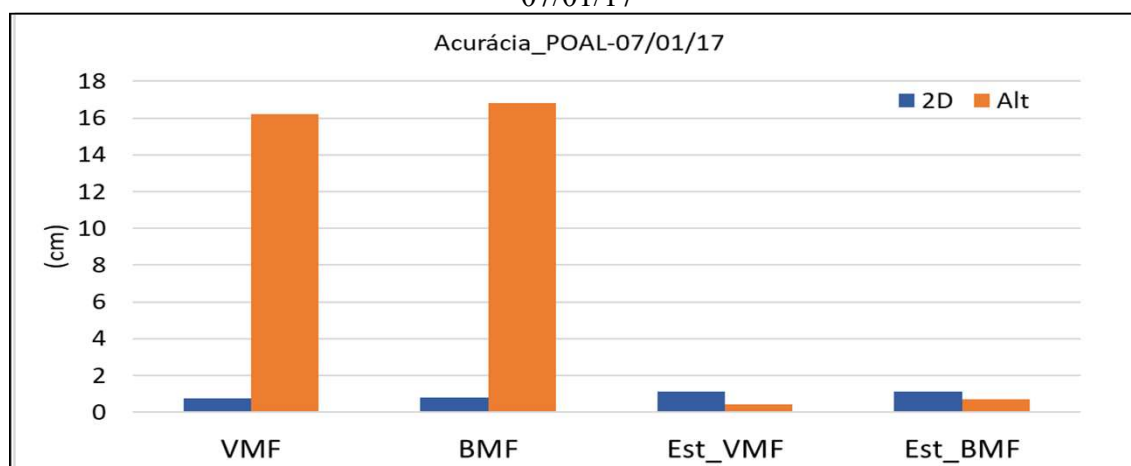


Figura 39 - Acurácia 2D e altimétrica (Alt) do PPP estático na estação POAL considerando todas as estratégias no cálculo do atraso (VMF, BMF, Est\_VMf e Est\_BMF) para o dia 07/01/17



O tempo de convergência do PPP estático para a estação NAUS é apresentado para as estimativas do atraso ao considerar os modelos BMF e VMF (Est\_BMF e Est\_VMf), respectivamente, nas Figuras 40 e 41. Pode-se notar que para ambos os modelos as discrepâncias convergem para valores da ordem de 10 cm em torno de 17 min, e então se estabilizam. A componente E apresenta pequena variação, precisão de 15 cm (entre 23:15 33:30) após 33 min e 45 seg (como pode ser observado nas respectivas precisões). A precisão das três componentes (ao mesmo tempo) alcança 10 cm após 33 min 45 seg, sendo que E é a

componente que requer maior tempo para convergir. A estação POAL, com modelos BMF (Est\_BMF) e VMF (Est\_VMF) (figuras 42 e 43, respectivamente), apresenta precisão em torno de 10 cm após 35 min 45 seg. Logo, para determinar o tempo de convergência do PPP são considerados, ao mesmo tempo, a combinação de discrepância e precisão ao atingir 10 cm. Nesse sentido, as estações NAUS e POAL diferem cerca de 2 min no tempo de convergência. A acurácia do PPP é pior na estação POAL que na estação NAUS.

Figura 40 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP estático na estação NAUS da estimativa do atraso com o modelo BMF (Est\_BMF)

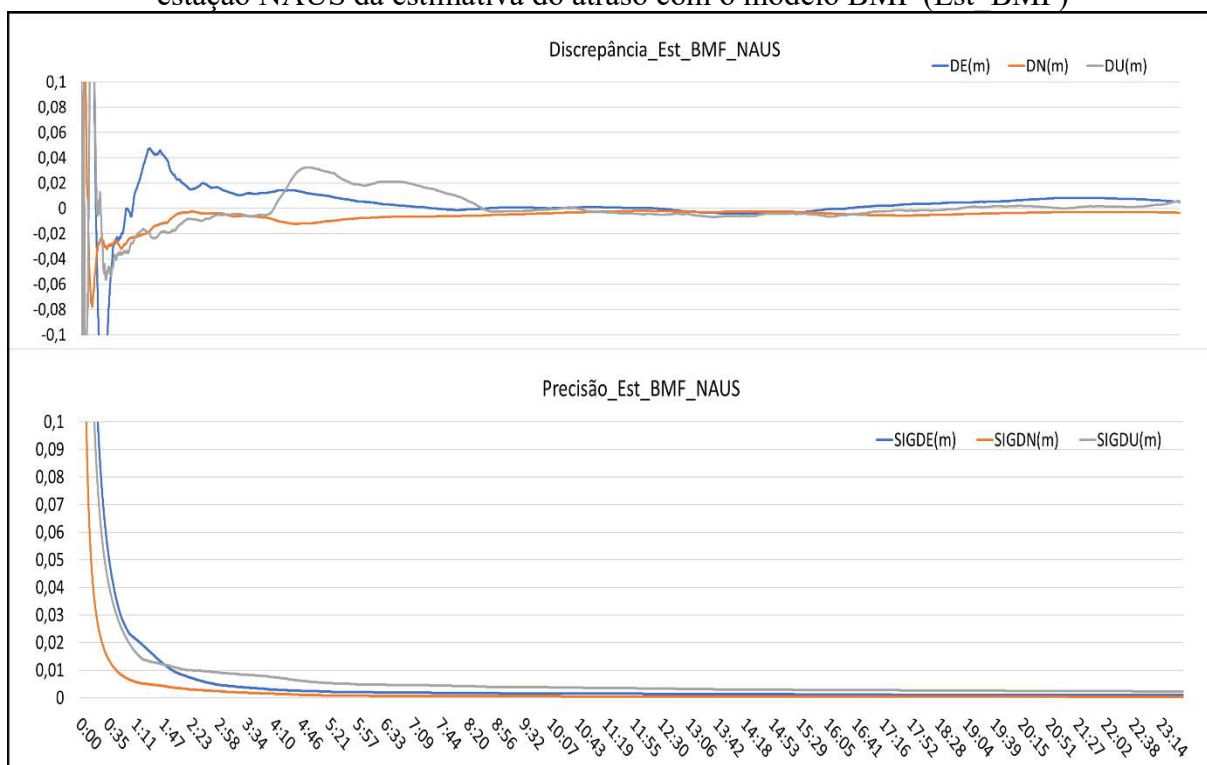


Figura 41 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP estático na estação NAUS da estimativa do atraso com o modelo VMF (Est VMF)

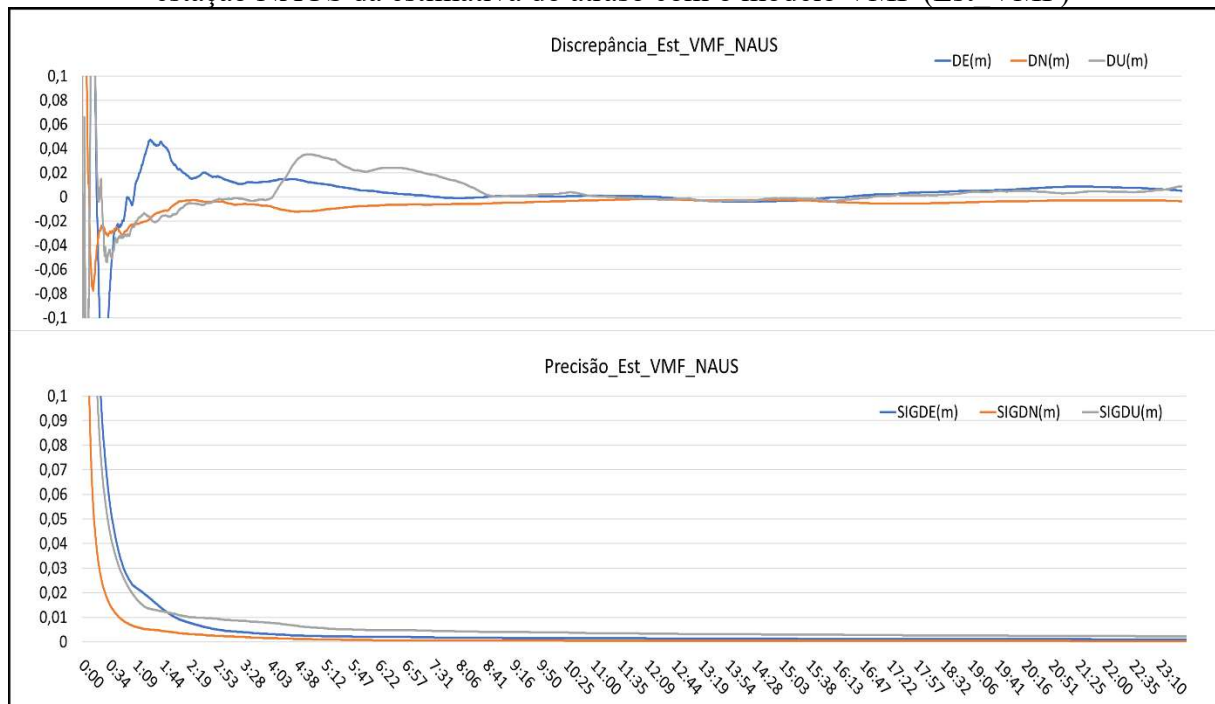


Figura 42 – Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP estático na estação POAL da estimativa do atraso com o modelo BMF (Est BMF)

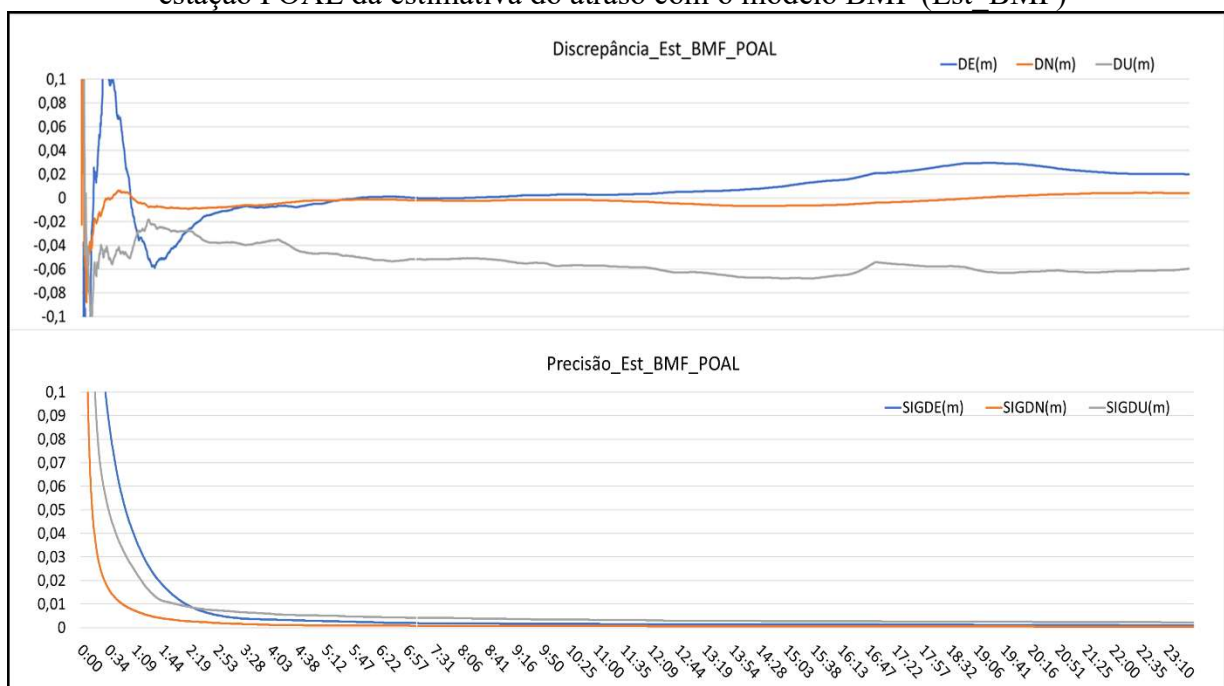
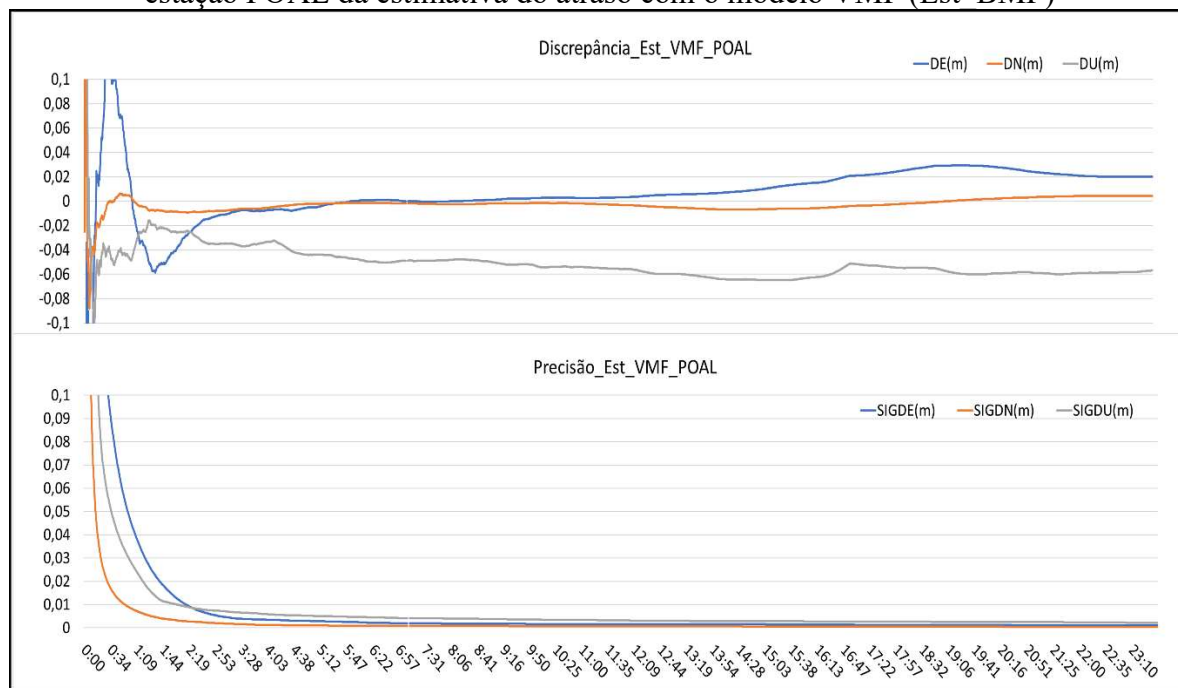


Figura 43 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP estático na estação POAL da estimativa do atraso com o modelo VMF (Est\_BMF)



### 6.1.2 Avaliação da BMF no PPP estático com diferentes épocas de inicialização

Nessa seção será realizada uma análise sobre o resultado do PPP ao considerar diferentes inicializações. Foram considerados os intervalos das 00h às 06h; 06h às 12h; 12h às 18h e das 18h às 23:45h, com inicializações às 0, 6, 12 e 18hs UTC. A metodologia aplicada é a apresentada na seção 6.1, porém nessa seção é determinada a REQM a partir das discrepâncias.

Buscou-se investigar a qualidade dos modelos BMF e VMF aplicados na modelagem do atraso no PPP, considerando as previsões e análise dos respectivos modelos de PNT (WRF e ECMWF).

Na tabela 9, para a estação NAUS, pode-se notar que o modelo BMF apresenta REQM das discrepâncias 2D melhor que o modelo VMF no período das 12 às 18 h e pior das 6 às 18 h, nos demais os modelos apresentam resultados estatisticamente iguais. O modelo BMF em altitude tem qualidade igual ao modelo VMF. Quando se considera a estimativa, o modelo BMF (Est\_BMF) apresenta qualidade semelhante ao Est\_VMF (Est\_BMF superior 0,02 cm) e qualidade superior no período de 12h-18h, de 0,1 cm. Em relação à componente altimétrica, o modelo BMF apresenta-se inferior ao VMF, na maioria das épocas, na última época de inicialização (18h), o modelo BMF apresenta melhoria de 1 cm em relação

ao VMF. Mas, ao considerar a estimativa com os modelos (Est\_BMF e Est\_VMF), o BMF apresenta menor discrepância em quase todas os períodos, ou seja, melhorias de 0,3 cm às 0h e às 12h; 0,2cm às 18h. Apenas na inicialização das 6h o Est\_BMF apresentou-se inferior ao Est\_VMF com 0,3 cm.

Tabela 9 - Síntese da análise da REQM (cm) das discrepâncias 2D e da altitude da estação NAUS

REQM 2D	0 - 6h	6 - 12h	12 -18h	18 -24h
VMF	0,7	1,9	2,3	0,4
BMF	0,7	2,1	2,2	0,4
Est_VMF	0,9	0,9	3,4	0,7
Est_BMF	0,9	0,9	3,3	0,7
REQM Alt	0 - 6h	6 - 12h	12 -18h	18 -24h
VMF	4,6	11,1	3,7	1,0
BMF	8,6	17,5	12,9	0,03
Est_VMF	2,2	1,7	1,7	1,5
Est_BMF	1,9	2,1	1,3	1,3

Na tabela 10 é apresentada a acurácia (Equação (33)) dos modelos BMF e VMF bem como das estimativas ao considerá-los como valores a priori do atraso. Pode-se notar que em relação à acurácia 2D o modelo BMF apresenta melhor acurácia na inicialização de 12h, que coincide com as análises do WRF às 12h. As melhorias foram de 0,1 cm às 12h e na inicialização as 6h foi pior 0,2 cm, nas demais BMF e VMF apresentam qualidade igual. Considerando a estimativa, o modelo BMF apresenta-se melhor (0,1 cm) que a do VMF na inicialização das 12h e nas demais inicializações acurácia semelhante (BMF melhor cerca de 0,02 cm). A acurácia altimétrica do modelo VMF apresenta qualidade superior ao BMF nas três primeiras inicializações (de 4 cm até 9 cm). Já na inicialização das 18h apresenta melhoria de 0,3 cm. Mas, na estimativa, a do modelo BMF (Est\_BMF) apresenta melhoria em relação a maioria das inicializações (0,3cm – 0h; 0,3cm - 12h; 0,1cm – 18h), exceto para a inicialização das 6h, algo em torno de 0,1 cm em favor da VMF.

Tabela 10 - Síntese da análise da acurácia (cm) 2D e da altitude da estação NAUS

Acurácia 2D	0 - 6h	6 - 12h	12 - 18h	18 - 24h
VMF	0,7	1,9	2,3	0,5
BMF	0,7	2,1	2,2	0,5
Est VMF	1,0	1,0	3,4	0,8
Est BMF	1,0	1,0	3,3	0,8
Acurácia Alt	0 - 6h	6 - 12h	12 - 18h	18 - 24h
VMF	4,6	11,3	3,8	2,1
BMF	8,6	17,7	13,0	1,8
Est VMF	2,2	5,5	1,7	4,7
Est BMF	1,9	5,6	1,4	4,6

Na tabela 11 é apresentada a REQM da discrepância dos modelos BMF e VMF para a estação POAL. O modelo BMF apresentou maiores REQM 2D das discrepâncias que o VMF. Na estimativa do atraso o modelo BMF apresentou estatisticamente os mesmos resultados que o modelo VMF (BMF melhor 0,01 cm). O modelo BMF apresentou menor REQM altimétrica (Alt) de 8,1 cm das 12 às 18h. Nas demais inicializações o modelo VMF apresentou acurácia superior ao BMF. Em relação as estimativas do atraso, o modelo BMF apresentou melhor resultado na inicialização das 0 às 6h de (0,3 cm), nas demais o modelo VMF apresentou melhores resultados (em média de 0,3 cm).

Tabela 11 - Síntese da análise da REQM (cm) das discrepâncias 2D e da altitude da estação POAL

REQM 2D	0 - 6h	6 - 12h	12 - 18h	18 - 24h
VMF	3,7	3,7	1,8	1,0
BMF	4,7	4,5	3,7	2,1
Est VMF	0,9	1,1	7,6	1,0
Est BMF	0,9	1,1	7,6	1,0
REQM Alt	0 - 6h	6 - 12h	12 - 18h	18 - 24h
VMF	17,6	20,2	23,9	7,4
BMF	23,8	24,7	15,8	9,8
Est VMF	0,4	0,6	2,7	1,0
Est BMF	0,1	1,0	3,0	1,3

A acurácia para estação POAL é apresentada na tabela 12, onde se pode notar que o modelo BMF apresentou pior acurácia 2D em todas as inicializações. Na estimativa o modelo BMF apresentou acurácia igual estatisticamente (melhor 0,01cm as 0h e 6h) a VMF. Na acurácia altimétrica o modelo BMF é 8,1 cm melhor que o modelo VMF na inicialização



das 12 às 18h. Na estimativa o BMF (Est\_BMF) é melhor que a VMF apenas das 0 às 6h (melhor 0,1 cm).

Tabela 12 - Síntese da análise da acurácia (cm) 2D e da altitude da estação POAL

Acurácia 2D	0 - 6h	6 - 12h	12 -18h	18 -24h
VMF	3,7	3,7	1,9	1,1
BMF	4,7	4,5	3,7	2,1
Est VMF	1,0	1,2	7,6	1,0
Est BMF	1,0	1,2	7,6	1,0
Acurácia Alt	0 - 6h	6 - 12h	12 -18h	18 -24h
VMF	17,6	20,2	23,9	7,4
BMF	23,8	24,7	15,8	9,8
Est VMF	0,6	0,9	2,7	1,1
Est BMF	0,5	1,2	3,1	1,4

Considerando o exposto, para o dia avaliado (07/01/17) no PPP estático, o modelo BMF apresentou-se menos acurado que o VMF para a estação NAUS, porém apresentou-se mais acurado no PPP ao ser aplicado na estimativa (Est\_BMF) do atraso. Logo, para posicionamento de alta acurácia ele se apresenta superior, com acurácia melhor que 0,1 a 0,3 cm, tendo como contrapartida o VMF (Est\_VMF). A melhoria do modelo BMF na estimativa no intervalo 12 as 18h pode ser justificada devido a concomitância entre a época e a análise (12h).

Na estação POAL o modelo BMF apresentou-se superior (8 cm) em altimetria ao VMF apenas na inicialização das 12 h (época da análise). Quanto à estimativa do atraso com a BMF (Est\_BMF) a componente 2D apresentou melhor ou qualidade semelhante em todos os casos.

### 6.1.3 Avaliação da BMF no PPP cinemático: diferentes modelagens do atraso

A metodologia da avaliação da BMF para o PPP foi apresentada na seção 6.1, ou seja, serão utilizadas as estações NAUS e POAL, as quais dispõem de coordenadas conhecidas (seção 4.2, figura 11). Será considerado que elas estão em movimento, com o intuito de avaliar a BMF com o PPP no modo cinemático. Foram aplicadas duas estratégias: uma ao analisar a qualidade da BMF em 24h de processamento, e outra considerando apenas o período próximo à análise (12 às 18h). Esse último se deve aos resultados apresentados na seção 6.1.2.

Como intervalo de tempo para convergência da precisão, será considerado o instante em que todas as componentes atinjam 10 cm de discrepância e precisão, pela primeira vez.

Para a estação NAUS é possível verificar que a convergência a 10 cm, quer seja com o uso dos modelos BMF (figura 44) e VMF (figura 45), só ocorre após terem decorridas 1h16min. No entanto, posteriormente (6 horas) é degradada em altimetria (de 20 à 35cm), sendo o BMF ainda pior, pois essa degradação permanece 6h (18h) a mais que com o VMF (12h)

Ao considerar a estimativa com o modelo BMF (Est\_BMF) e o modelo VMF (Est\_VMF), (figura 46) e (figura 47) respectivamente, em ambas as estimativas o PPP cinemático converge para algo em torno de 10 cm em E, 2,4 cm em N e 5 cm em U com cerca de 35 min. Mas sofre um aumento na discrepância, de até 15 cm, e melhoria da precisão após as 18h.

As discrepâncias (ou erro) 2D e altimétrica (U), dos dois modelos (BMF e VMF) e as respectivas estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF) são apresentadas em conjunto na figura 48 para fins de comparação. A convergência na componente 2D ocorre após os 35 min iniciais. Já em altimetria a convergência com os modelos (BMF e VMF) ocorre após 3h e na sequência há uma degradação (maior com modelo BMF) e após as 18h os modelos voltam a convergir. Com as estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF) a convergência ocorre somente após 18min, depois ocorre degradação e voltam a convergir as 5h, com pequenas variações (no máximo 13 cm) até as 24h de processamento dos dados.

Figura 44 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo BMF e 24h de dados

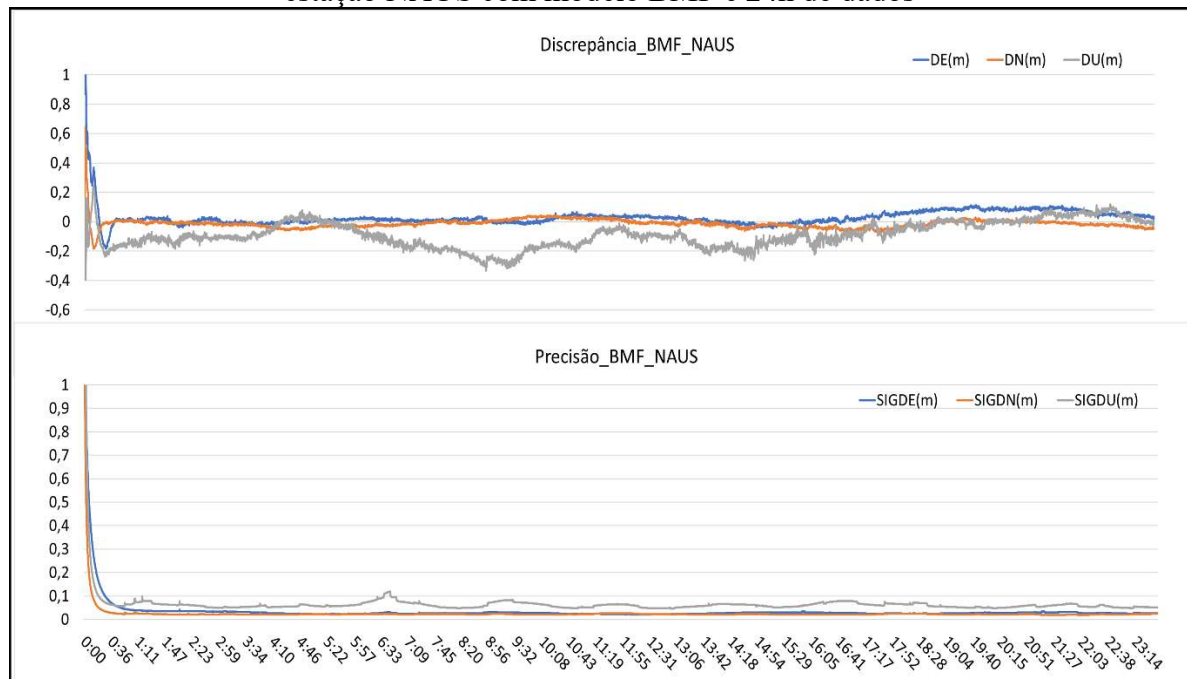


Figura 45 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo VMF e 24h de dados

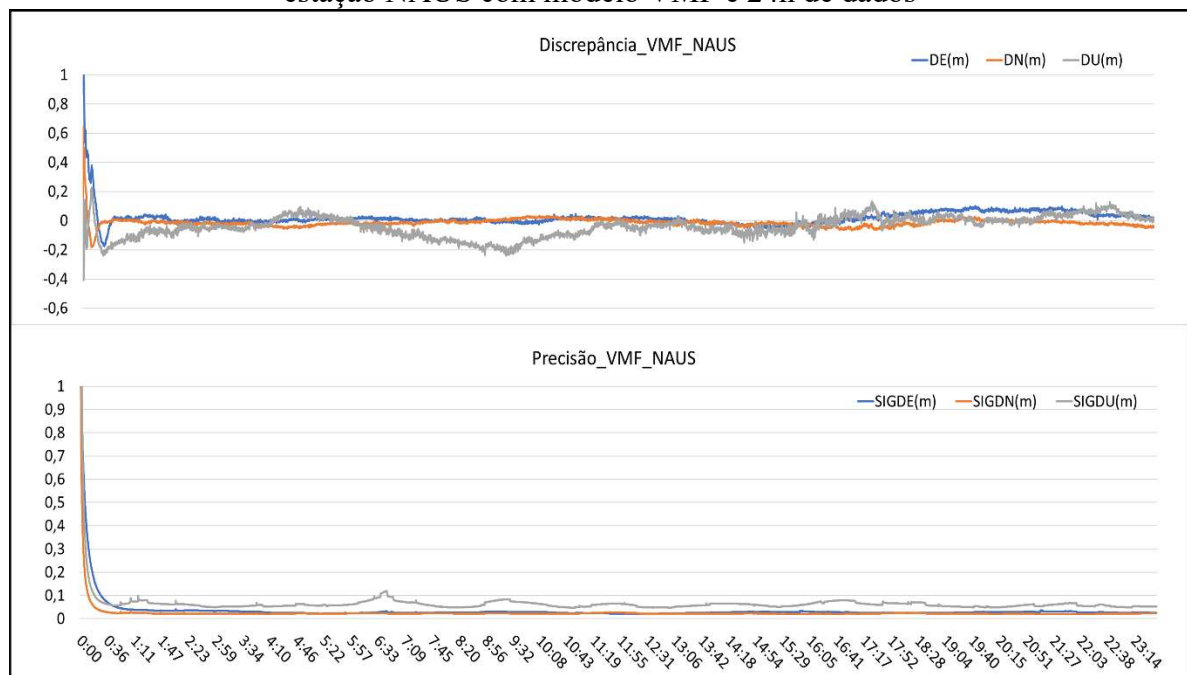


Figura 46 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo Est BMF e 24h de dados

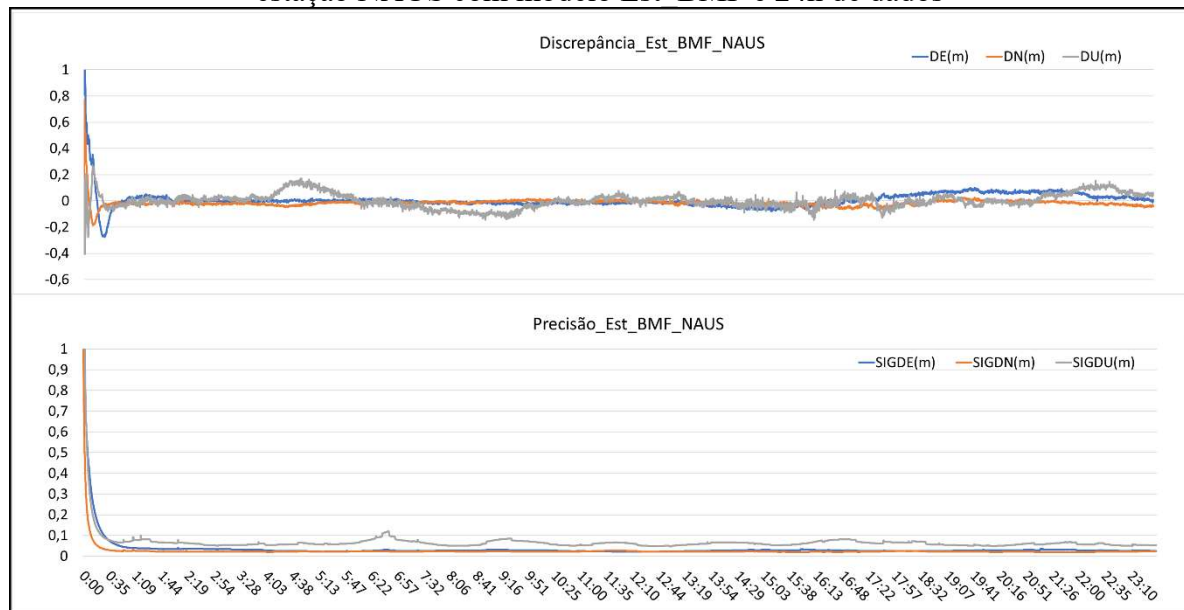


Figura 47 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo Est VMF e 24h de dados

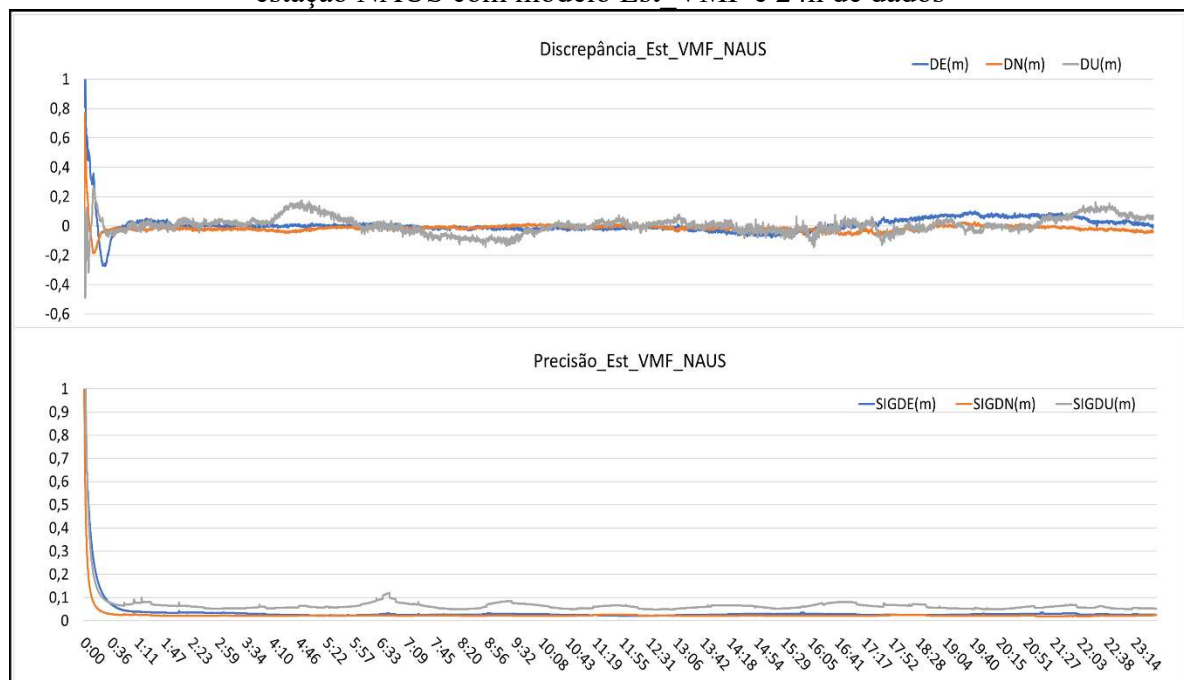
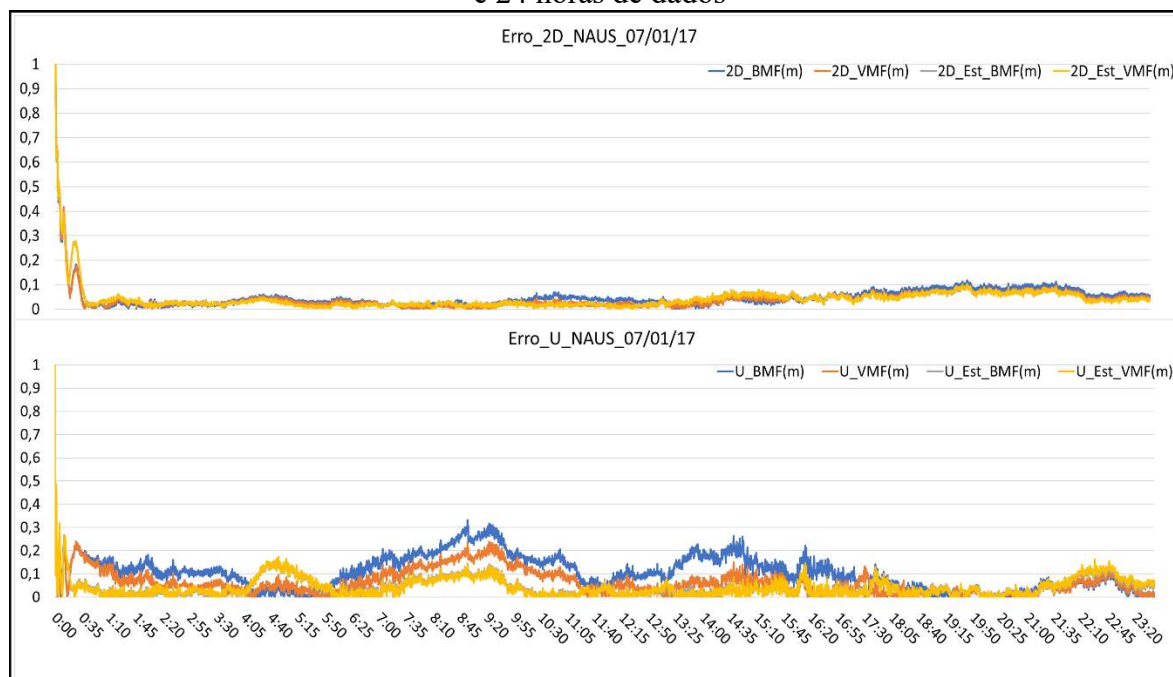


Figura 48 – Discrepância 2D, altimétrica (U) e tempo de convergência para os modelos (BMF, VMF) e das estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF) no PPP cinemático na estação NAUS e 24 horas de dados



Na estação POAL os modelos BMF (Figura 49) e VMF (Figura 50) apresentam convergência de 10 cm apenas no final do processamento, após as 20h, devido à componente altimétrica (as planimétricas convergiram em torno de 15h). Com as estimativas do atraso (Figura 51 e Figura 52) as discrepâncias foram até seis vezes menores.

Figura 49 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo BMF e 24h de dados

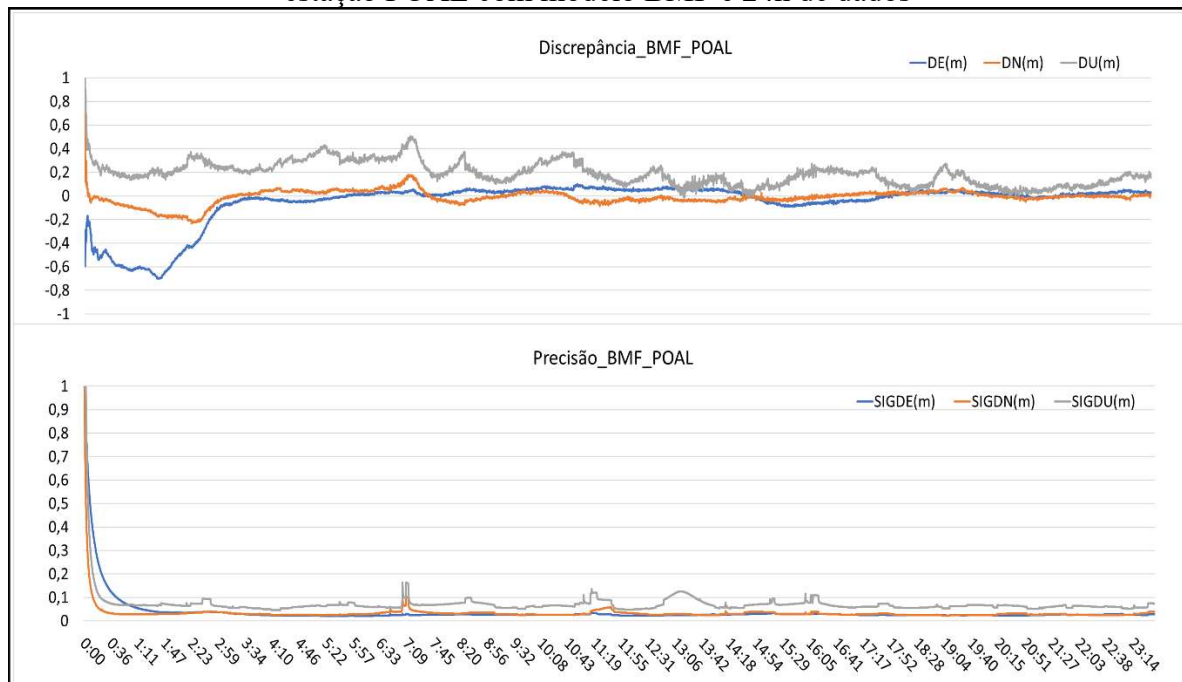


Figura 50 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo VMF e 24h de dados

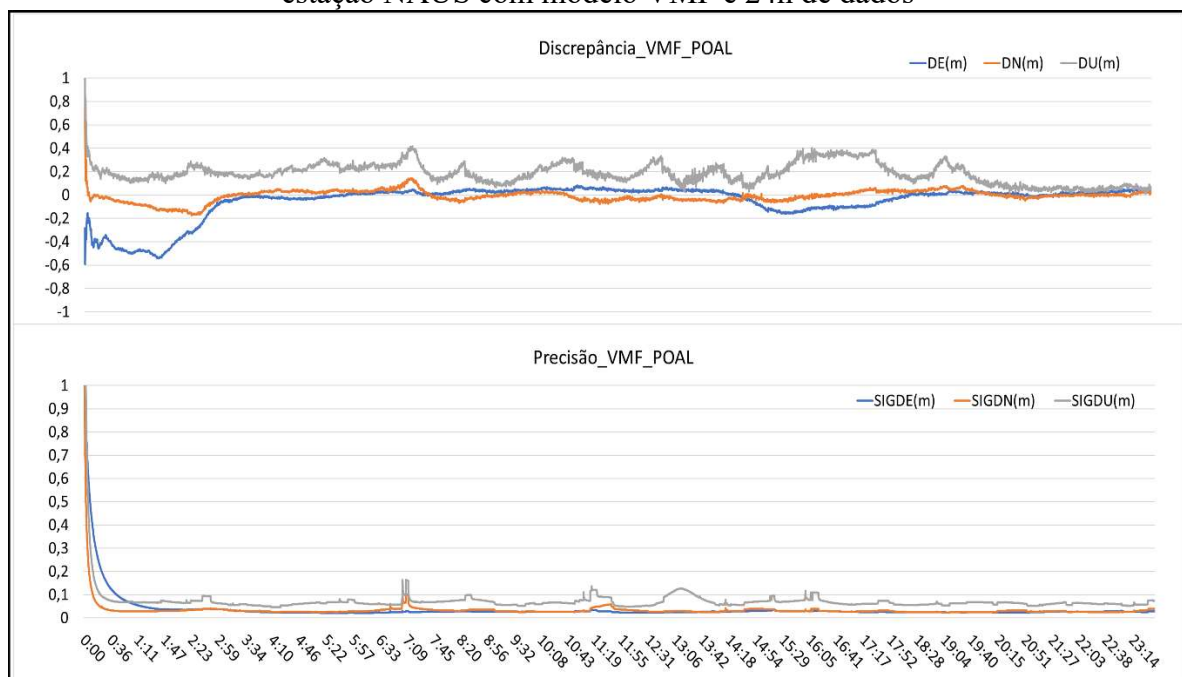


Figura 51- Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo Est BMF e 24h de dados

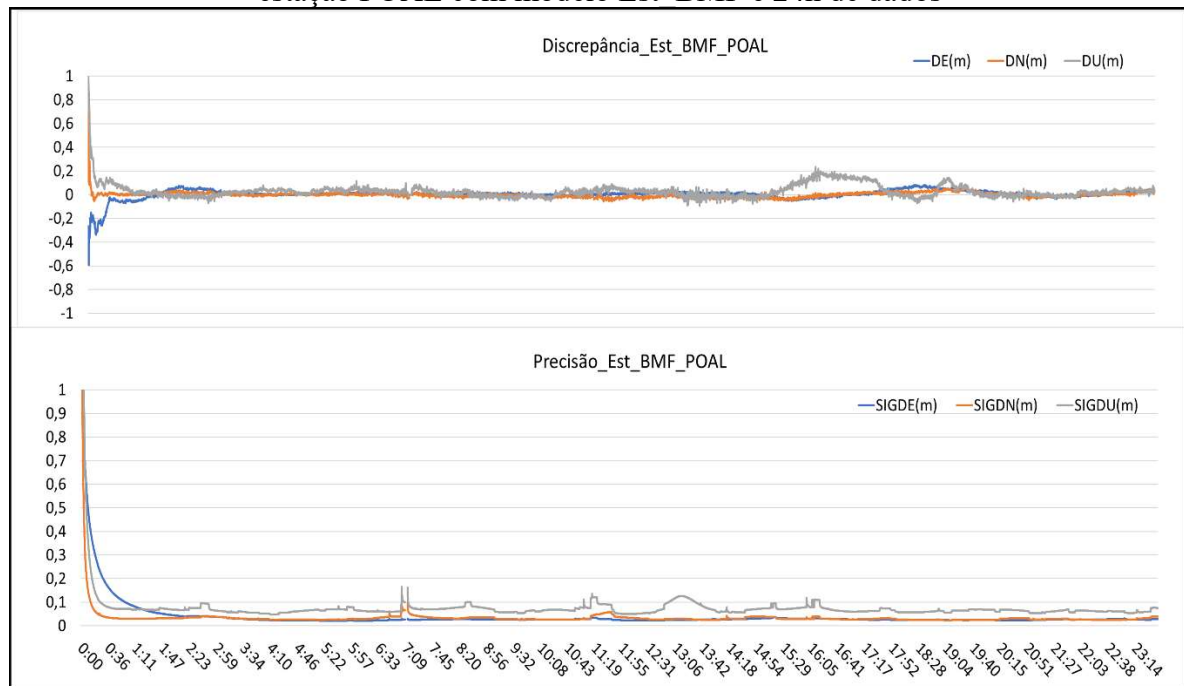
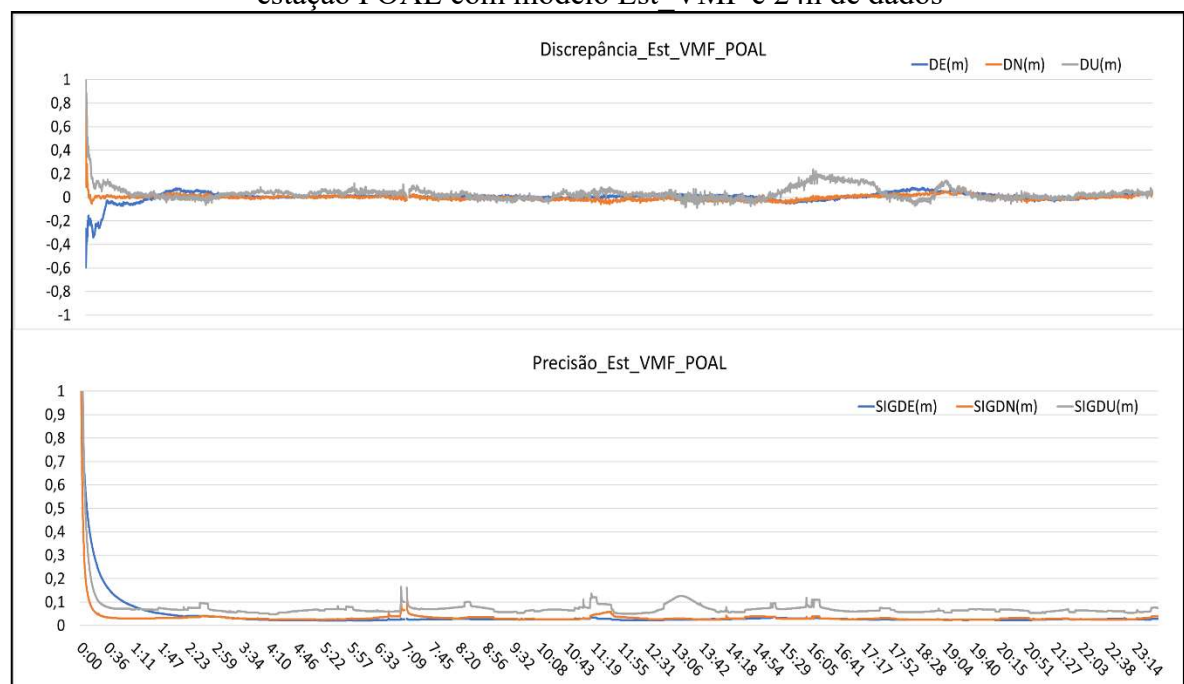


Figura 52 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo Est VMF e 24h de dados



Na Figura 53 é apresentado o gráfico das discrepâncias, podendo-se verificar que as estimativas dos modelos BMF e VMF apresentam resultados semelhantes e com convergência em torno de 40min, na componente 2D e altimetria, muito embora a componente altimetria apresente degradação no posicionamento (cerca de 20cm) após as 15h. Os modelos

BMF e VMF apresentam convergência 2D em torno de 4h, mas que é degradada por volta das 7h e novamente em torno de 15h. Na componente altimétrica (U), como já discutido, os modelos não convergem, atingindo em média 40 cm de discrepância. Vale destacar que, mesmo com o modelo BMF não apresentando menor discrepância (que seria inferior a 10cm), após as 12h ele é mais preciso que o VMF. Esse resultado pode estar relacionado com o atraso não hidrostático e total apresentado na Figura 54, em que o modelo BMF tem, após as 12 horas, valores do atraso mais semelhantes às estimativas no PPP. Por essa razão, surge a importância de avaliar a BMF no período próximo à análise, demonstrando a melhoria do BMF após a análise, resultado também apontado na seção 6.1.2.

Figura 53 - Discrepância 2D, altimétrica (U) e tempo de convergência para os modelos (BMF, VMF) e das estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF) no PPP cinemático na estação POAL e 24 horas de dados

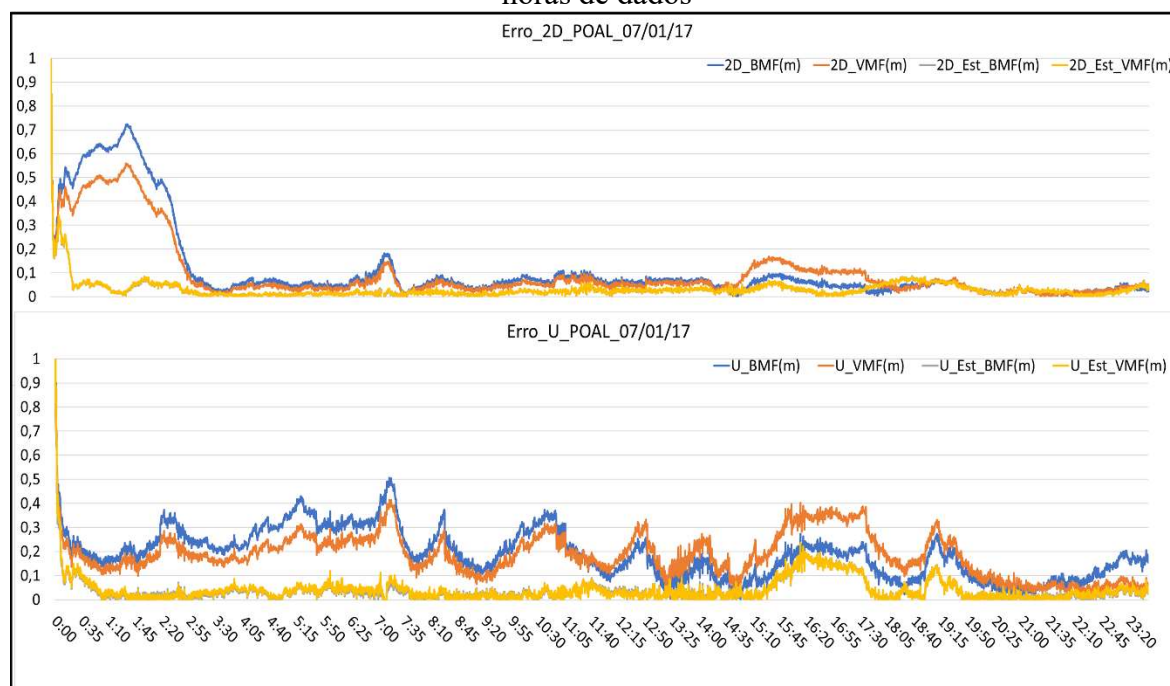
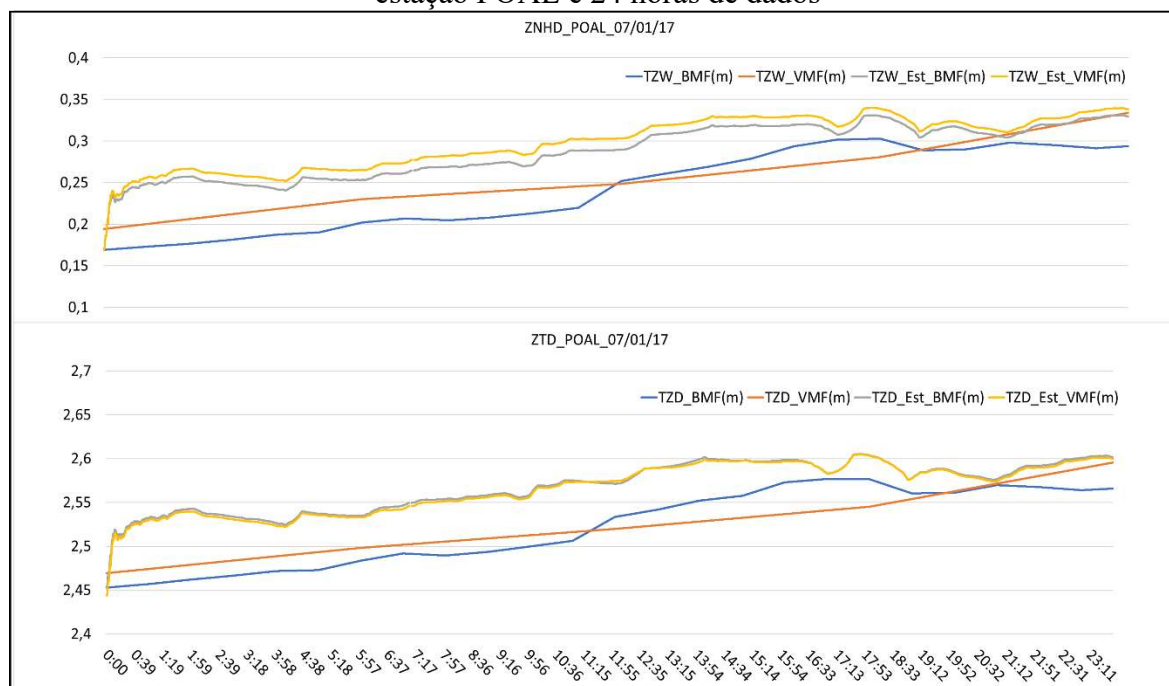




Figura 54 - Atraso não hidrostático (ZNHD) e total (ZTD) calculado para cada um dos modelos (BMF, VMF) e suas estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF) no PPP cinemático na estação POAL e 24 horas de dados



#### 6.1.4 Avaliação da BMF no PPP cinemático: análise e tempo requerido para a inicialização

Nessa seção foi considerada a metodologia descrita na seção 6.1, em que a duração da sessão processada se resume a 6h, iniciada após as 12h. Com relação aos modelos BMF (Figura 55) e VMF (Figura 56) na estação NAUS. Embora os resultados de ambos não convergiram (maiores que 10 cm), em relação à componente U, na qualidade do modelo BMF há uma degradação maior que do VMF. Ao estimar o atraso com ambos os modelos os resultados apresentados na Figura 57 e Figura 58 esses são semelhantes, com convergência próxima a 45 min (o que pode ser verificado a partir da discrepância e da precisão).

Figura 55 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo BMF das 12h às 18h

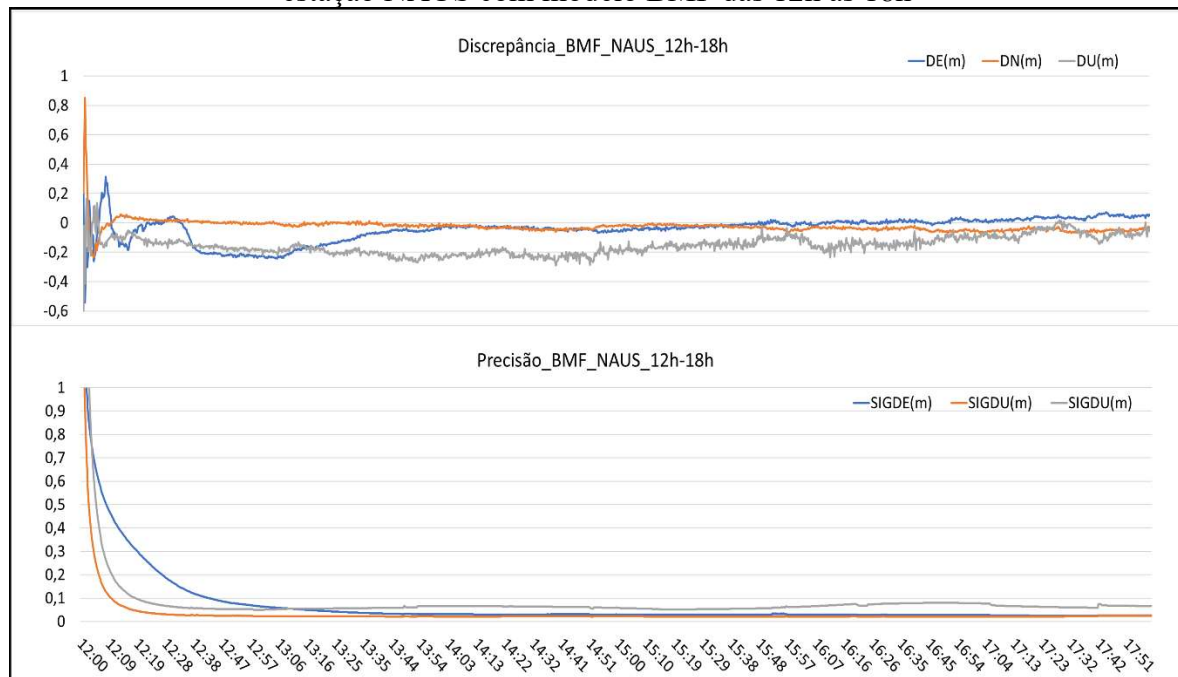


Figura 56 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo VMF das 12h às 18h

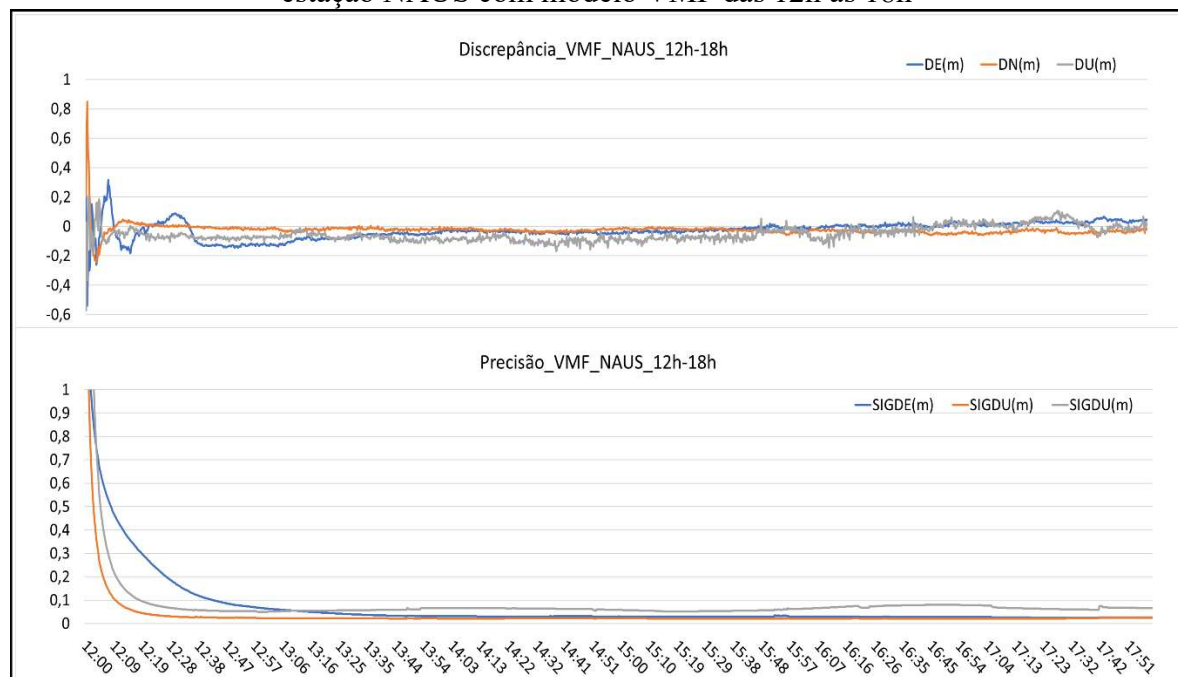


Figura 57 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo Est\_BMF das 12h às 18h

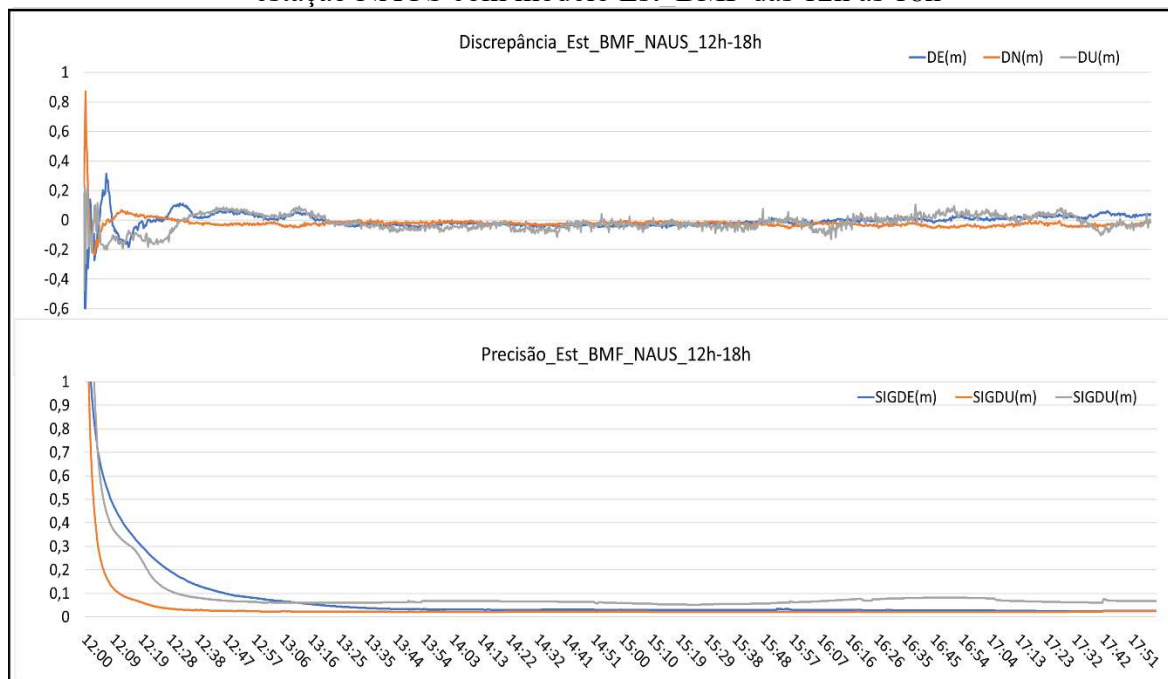
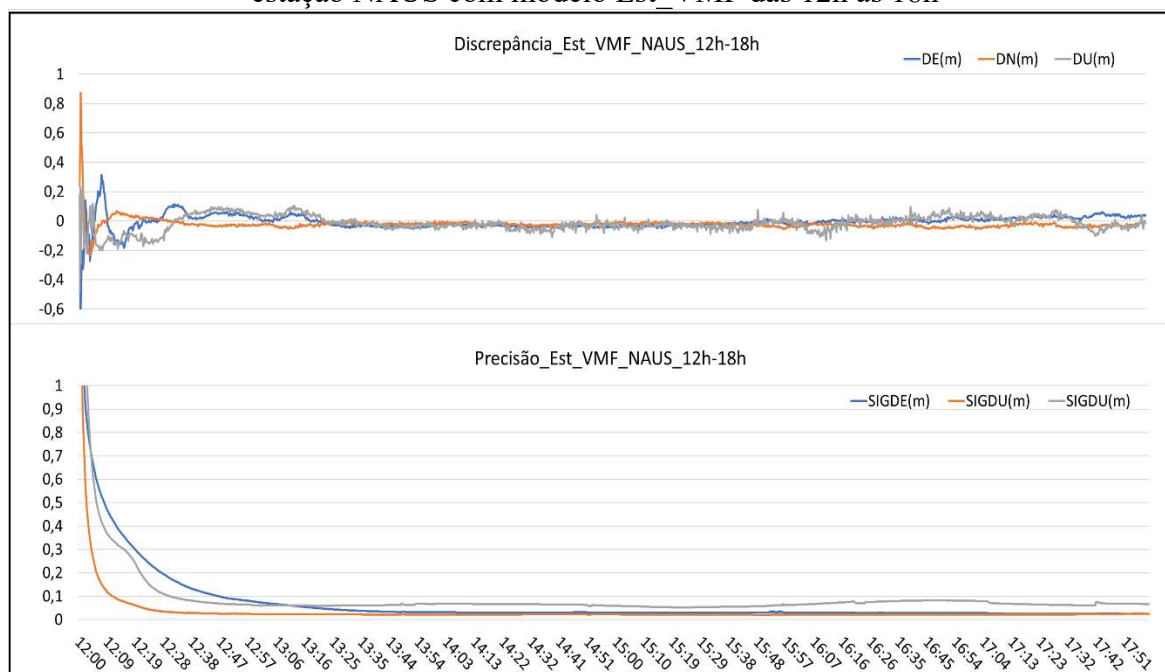


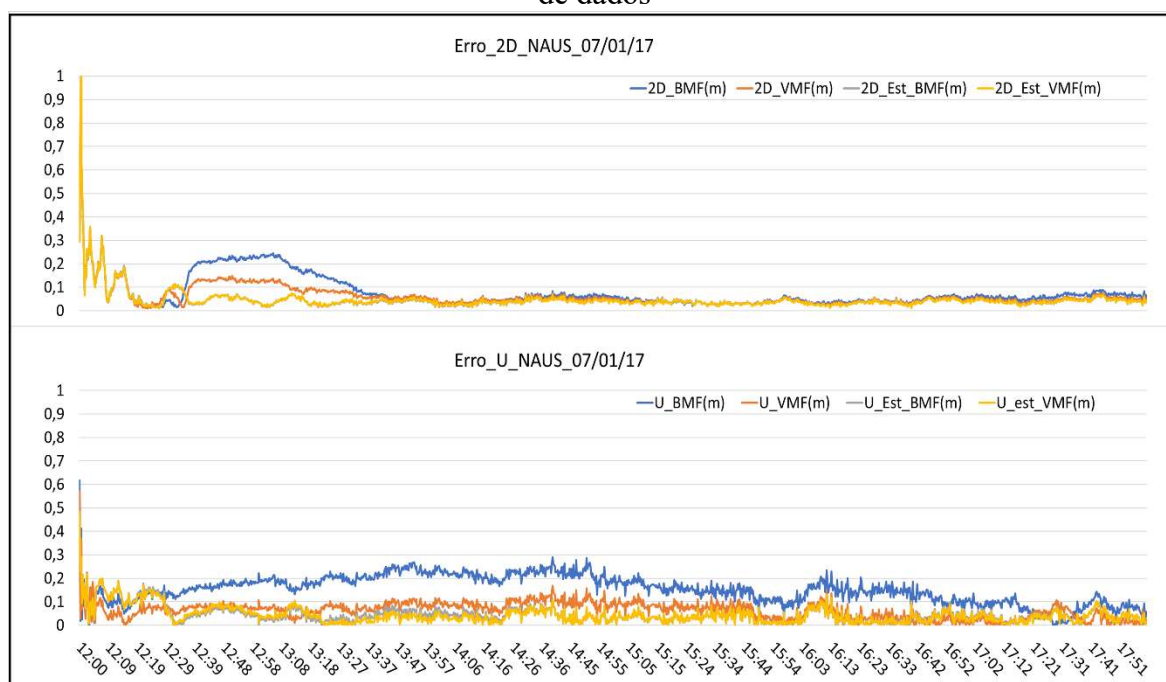
Figura 58 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação NAUS com modelo Est\_VMF das 12h às 18h



A partir do gráfico das discrepâncias (ou erros) da estação NAUS (Figura 59) verifica-se que, na componente 2D, os modelos (BMF e VMF) apresentam discrepância, assim como precisão melhor que 10 cm, com 18 min de dados, mas logo após há uma degradação. Nesse período o BMF é 10 cm menos preciso que o VMF - voltando a convergir após 1h30min com valores semelhantes aos estimados (Est\_BMF e Est\_VMF). As estimativas do BMF e

VMF apresentam convergência do PPP após 15 min, com discrepância e precisão melhor que 10 cm. Na componente altimétrica (U) o modelo BMF apresenta a pior discrepância (até 20 cm a mais que o VMF). Já quando envolve sua estimativa tem-se resultados semelhantes ao VMF (Est\_VMF). Isso mais uma vez reforça que o modelo BMF, na estação NAUS, apresenta melhores resultados na estimativa do atraso.

Figura 59 - Discrepância 2D, altimétrica (U) e tempo de convergência para os modelos (BMF, VMF) e das estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF) no PPP cinemático na estação NAUS com 6h de dados



Para a estação POAL os resultados são apresentados a seguir. Na Figura 60 é apresentado o PPP com o modelo BMF que, embora não apresente convergência (discrepâncias superiores à 10cm), apresenta discrepâncias com menores magnitudes que o modelo VMF (Figura 61), principalmente em relação às componentes E e U. Na estimativa dos modelos ambos apresentam resultados semelhantes com discrepância em torno de 20 cm (Figuras 62 e 63). Na estimativa com modelo BMF há uma melhoria na inicialização de 20 cm em relação a estimativa da VMF.

Figura 60 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo BMF das 12h às 18h

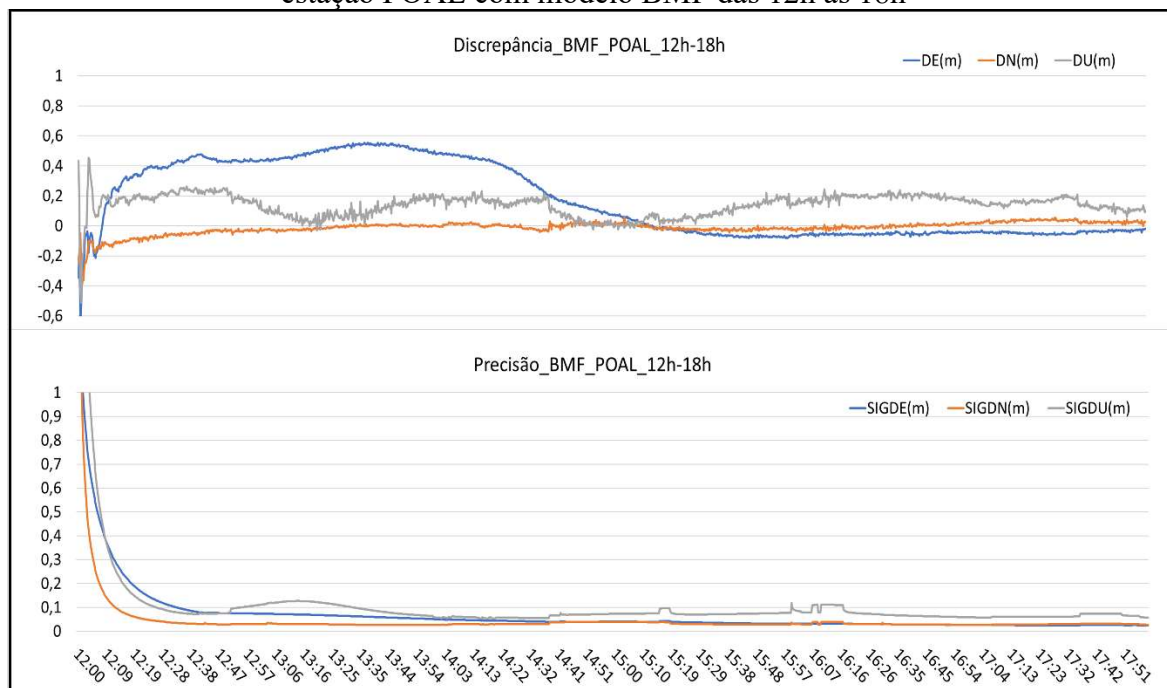


Figura 61 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo VMF das 12h às 18h

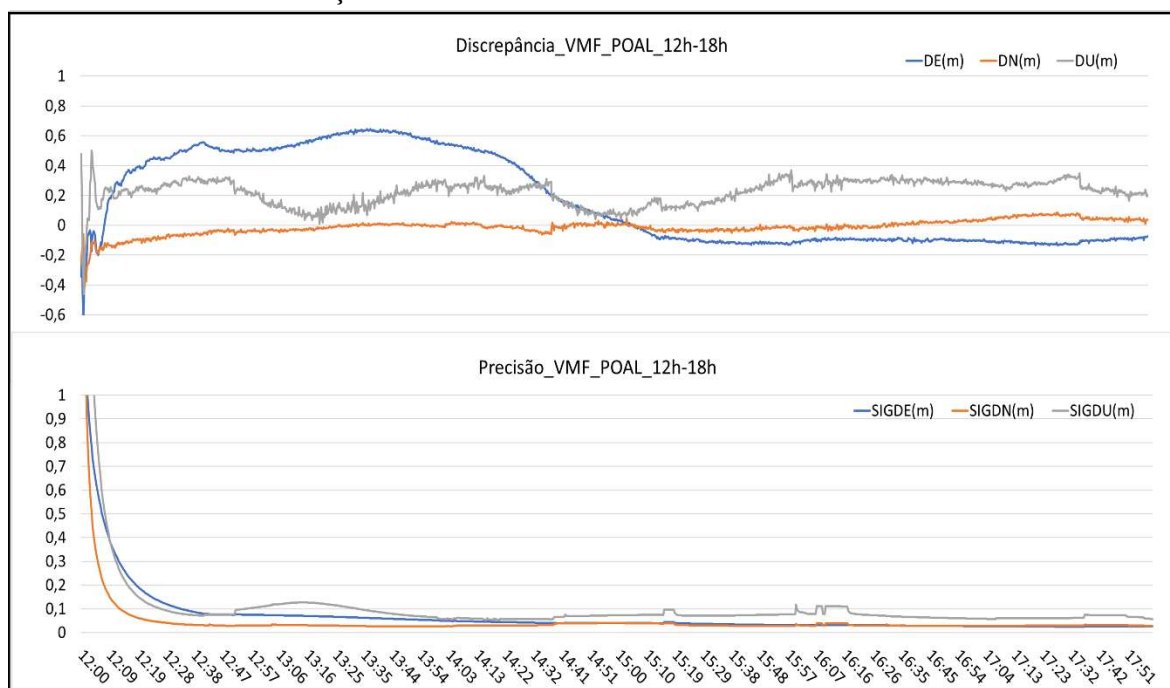


Figura 62 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo Est BMF das 12h às 18h

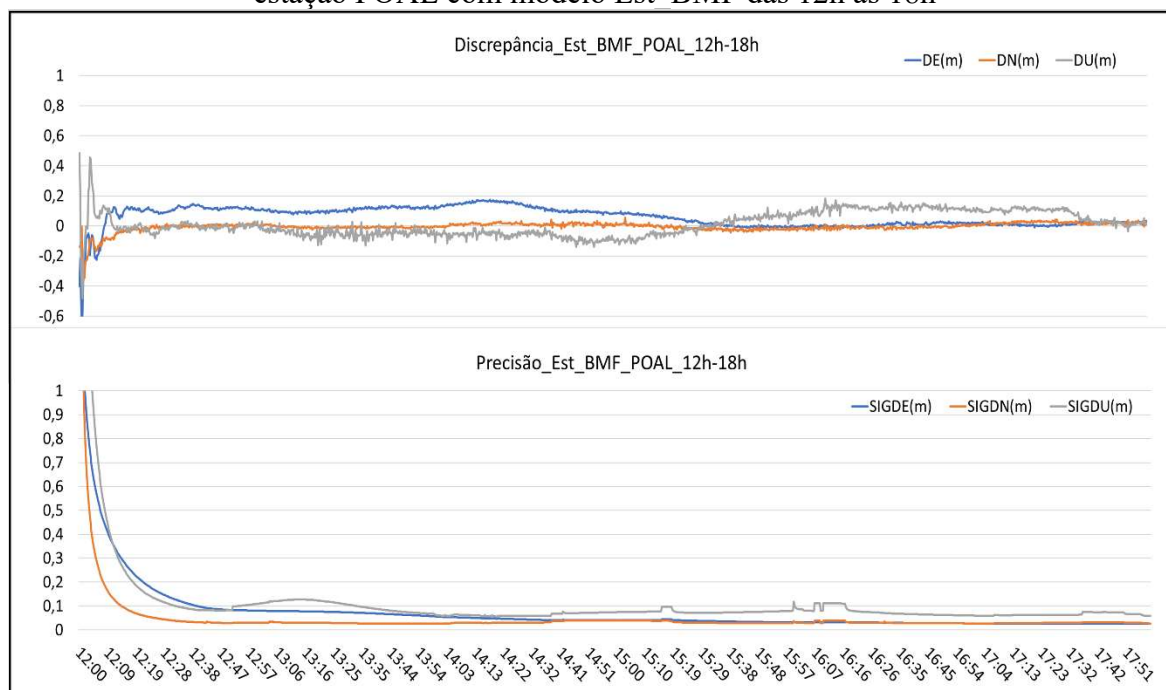
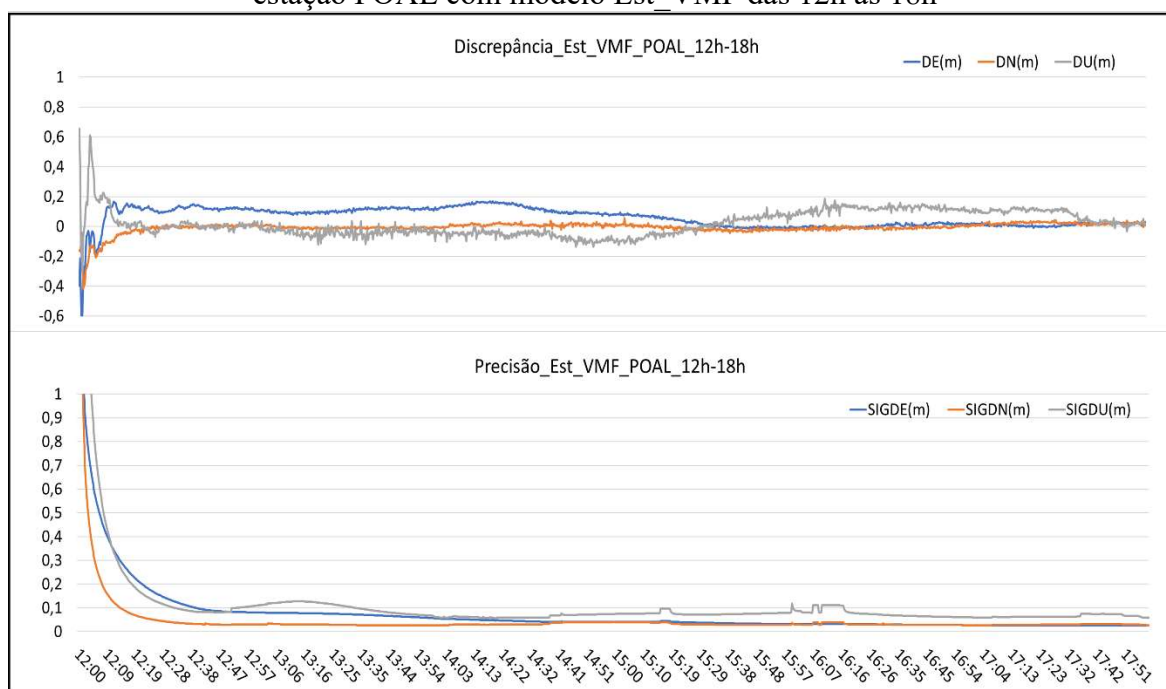


Figura 63 - Discrepância (m), precisão (m) e tempo de convergência do PPP cinemático na estação POAL com modelo Est\_VMF das 12h às 18h

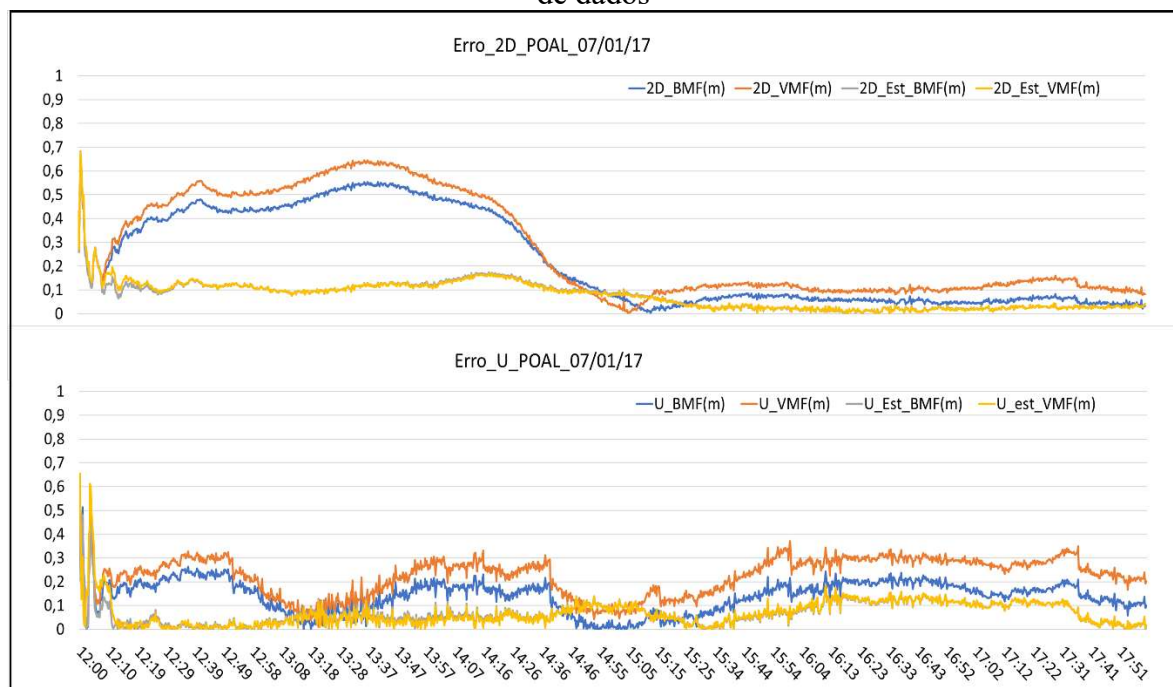


A partir da discrepância (erro) 2D e altimétrica, apresentada na Figura 64, é possível verificar que com a inicialização do PPP às 12h (concomitante à análise do WRF/PNT) o modelo BMF apresenta menor discrepância que o VMF nas 6 horas de dados processados, em ambas as componentes. A melhoria chega a 10 cm no 2D nas horas iniciais. Na discrepância



altimétrica essa melhoria em relação à VMF pode ser observada também após as 15h até o final do processamento, quando o modelo BMF se aproxima, na discrepância do posicionamento, com a estimativa. Com relação a componente altimétrica (U) o modelo BMF tem qualidade superior ao VMF ao longo das 6h de processamento dos dados (em torno de 10 cm), sendo que em alguns períodos (14h40min as 15h) o modelo é superior até em relação às estimativas dos modelos.

Figura 64 - Discrepância 2D, altimétrica (U) e tempo de convergência para os modelos (BMF, VMF) e das estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF) no PPP cinemático na estação POAL com 6h de dados



Logo, pode ser verificado que na estação NAUS o modelo BMF no processamento considerando os dados após a análise apresentou pior desempenho na componente U (Figuras 55 e 56), em E e N os resultados foram semelhantes ao VMF. As estimativas dos modelos (Est\_BMF e Est\_VMF) (Figuras 57 e 58) apresentaram resultados semelhantes nas três componentes (E, N, U). Resultado oposto ao apresentado na estação POAL, em que a discrepância apresentada, após a análise do modelo de PNT WRF (12h), foi superior ao modelo VMF, ao longo de todo o processamento (6h).

Considerando as variabilidades no intervalo de tempo requerido para a convergência da discrepância e precisão em torno de 10 cm para componente horizontal e vertical, apresenta-se na Tabela 13 uma visão geral do que se foi obtido com cada uma das estratégias adotadas. Na sequência, nas Tabelas 14 e 15, apresenta-se a média das discrepâncias

e a precisão (advinda do processamento) de todas as estratégias, considerando os resultados após uma hora de inicialização, das estações NAUS e POAL, respectivamente. Logo, poder-se-á ter uma visão geral do comportamento da BMF frente à VMF. Apenas os resultados iniciando-se às 12 horas é que foram considerados.

Pode-se notar que a convergência (Tabela 13) (das componentes E, N e U, e suas precisões simultaneamente) ocorre às 15h10min na estação NAUS, para o modelo BMF, enquanto que para o VMF ocorre 2h antes (devido à componente altimétrica). As suas estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF) apresentaram convergência aos 45 minutos. Na estação POAL os modelos BMF e VMF convergiram após 2h50min minutos. Na estimativa o BMF (Est\_BMF) convergiu 30 minutos antes do VMF (Est\_VMF).

Tabela 13 - Tempo requerido para a convergência da solução do PPP cinemático considerando discrepância e precisão.

12-18h	NAUS	POAL
BMF	3h10min	2h50min
VMF	1h10min	2h50min
Est_BMF	45min	1h00min
Est_VMF	45min	1h30min

Após uma hora de inicialização a estação NAUS (Tabela 14) com modelo BMF apresentou média da discrepância e precisão pior em relação ao VMF. Na estimativa, Est\_BMF, apresentou discrepância média semelhante a VMF a menos da componente U (inferior a 0,3 cm).

Na Tabela 15 é apresentada a média das discrepâncias e precisão para a estação POAL. Nota-se que o modelo BMF apresenta discrepância média menor (0,2 cm em N e 0,9 cm em U) e melhor precisão da discrepância em relação ao VMF, a menos da discrepância da componente E. Na estimativa ao considerar o modelo VMF (Est\_VMF) tem-se as menores discrepâncias e melhores precisões, a menos da precisão de N, em que Est\_VMF apresentou 0,2 cm mais preciso.

Portanto, considerando a estação POAL, não há diferença entre o tempo de convergência dos modelos (BMF e VMF). Nas suas estimativas (Est\_BMF e Est\_VMF), o modelo BMF converge 30 min mais rápido. Assim, não se pode verificar um padrão de tempo de convergência menor ou maior em relação aos modelos ou suas estimativas (entre as estações NAUS e POAL são inversos). A partir das médias das discrepâncias das componentes E, N e U e da precisão, nota-se que o modelo BMF apresentou melhor qualidade que o VMF, na



estação POAL. Na estação NAUS VMF tem melhores resultados. Nas estimativas o BMF (Est\_BMF) apresentou performance equivalente ao VMF nas componentes planimétricas para a estação NAUS, também nas altimétricas para POAL.

Tabela 14 - Média das discrepâncias e precisão da estação NAUS

NAUS	Média (cm)			Precisão (cm)		
	DE	DN	DU	DE	DN	DU
BMF	-2,9	-3,1	-15,5	3,2	2,2	6,3
VMF	-2,1	-2,8	-5,0	3,2	3,2	6,3
Est BMF	-0,9	-2,6	-1,6	3,2	3,2	6,5
Est VMF	-0,9	-2,6	-1,3	3,2	3,2	6,5

Tabela 15 - Média das discrepâncias e precisão da estação POAL

POAL	Média (cm)			Precisão (cm)		
	DE	DN	DU	DE	DN	DU
BMF	13,6	0,0	12,8	4,0	3,1	7,5
VMF	12,4	0,2	21,8	4,0	4,0	7,5
Est BMF	5,7	0,0	1,4	4,2	4,2	7,7
Est VMF	5,5	0,0	1,8	4,2	4,2	7,7

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões

Como pôde ser visto no decorrer dessa tese, a atmosfera neutra apresenta características distintas da camada denominada de troposfera. Para demonstrar a diferença de forma clara, foi detalhado no texto a descrição e definição de ambas as denominações. Também foi apresentada a justificativa para a adoção da denominação do atraso que o sinal sofre ao atravessar a camada neutra de atraso de propagação na atmosfera neutra e não troposférico (adotado por grande parte da comunidade científica). Essa adequação na terminologia vem sendo empregada (por pesquisas e artigos da área) por ser mais coerente e expressar o atraso ao longo dos 50km da atmosfera neutra, não apenas nos 15km iniciais nos quais se resume a troposfera.

A diferenciação entre as duas camadas é importante principalmente pelo efeito que ocorre no sinal GNSS devido às variáveis atmosféricas (pressão, temperatura e umidade) que as compõem. O sinal é impactado por toda a espessura da atmosfera que percorre (quanto menor o ângulo de elevação, maior porção da atmosfera), ou seja, pelos 50km e não apenas pelos 15km da troposfera. As variáveis presentes na atmosfera neutra, as quais descrevem o atraso, apresentam grande variabilidade no Brasil, devido à sua extensão territorial, que têm características climáticas distintas, de acordo com a região e a época do ano. Nesse sentido, a PNT regional desenvolvida pelo CPTEC/INPE apresenta-se como a melhor alternativa na determinação das variáveis atmosféricas sobre o Brasil.

Diferentes trabalhos foram desenvolvidos na avaliação da modelagem do atraso zenital ao considerar a PNT regional e os resultados foram promissores. Mas para a modelagem do atraso inclinado sempre foram aplicadas funções de mapeamento globais, como a VMF1 ou GMF. Assim, com o intuito de ter o domínio dessa metodologia, além de desenvolver uma função de mapeamento que considere as características climáticas regionais, nessa tese é apresentada a função de mapeamento brasileira (BMF). A BMF considera em sua modelagem o modelo de PNT regional de maior resolução, o WRF 5km, além da aplicação da técnica de traçado de raio. A metodologia aplicada na BMF é composta por diferentes etapas. Devido a sua complexidade essa foi apresentada em um capítulo, com a descrição dos dados de entrada, a técnica aplicada e os diferentes resultados obtidos a partir dela (zenital, inclinado, fator inclinado e a própria função).

A fim de validar a função desenvolvida foram realizados diferentes experimentos, considerando um ano de dados; graças à realização de um processo de automatização da BMF. O primeiro conjunto de experimentos considerou uma ampla avaliação (um ano de dados) do atraso zenital, disponibilizado pela BMF em relação aos dados de radiossondas, considerados como referência. Pôde-se verificar a alta qualidade do atraso zenital, tanto na série anual (uma época por dia), quanto na série semanal (24 épocas por dia). O atraso zenital obtido a partir da BMF apresentou melhor REQM para a estação ao Norte (NAUS) e houve uma degradação dessa qualidade em relação as demais estações, e em até seis vezes (de 1,9 a 6,3 cm – de NAUS, CUIB, POLI à POAL) ao Sul (POAL). Quanto à análise anual, na série semanal, a diferença entre a REQM diminuiu para até duas vezes (2,4 cm–NAUS; 4,16 cm POAL) em que NAUS teve desempenho superior à POAL. A análise semanal apresenta a vantagem de obter o atraso a partir de alta resolução temporal (horária), visto que há uma variação, ao longo de um mesmo dia, de até 20 cm (POAL).

O atraso inclinado foi discutido em relação à média das séries e desvio padrão das médias, uma vez que para esses dados não havia referências. Para o ângulo de elevação de 3° graus o atraso inclinado hidrostático médio foi de 41 m (43 m em NAUS) e o não hidrostático em torno de 6 m (NAUS com maior valor 7 m). O melhor resultado (menor REQM) do atraso total apresentado foi de 88 cm em NAUS e o pior em CUIB de 1,37 m.

O fator do atraso inclinado, razão entre o inclinado e o zenital, apresentou valores superiores do atraso não hidrostático em relação ao hidrostático e total. Isso se deu pois, quanto menores os denominadores (ZNHD inferiores a 1 m) maior o fator. Esse fator não tem uma unidade de medida, e o seu impacto pode ser observado nas funções de mapeamento. Para quantificar a magnitude e variação por região foi apresentada a variação anual desse fator em relação às diferentes regiões brasileiras avaliadas. Embora na análise do atraso e fator inclinado não tenha sido possível avaliar a qualidade desses (por ausência de referência) especula-se que a qualidade seja semelhante (se não a mesma) que a apresentada para o atraso zenital.

O segundo conjunto de experimentos foi realizado com o objetivo de obter uma análise preliminar da qualidade da BMF na eliminação do atraso no posicionamento de alta acurácia, o PPP, modo estático e cinemático. Esses experimentos foram realizados para um dia de processamento e nas duas estações que apresentaram maior variação de magnitude e qualidade do atraso (NAUS e POAL). Na estação NAUS o modelo BMF apresentou resultado inferior ao VMF; já aplicado à estimativa apresentou qualidade superior (de 0,1 a 0,3 cm) em planimetria (2D) e altimetria (U), em relação a estimativa com o VMF1. Na estação POAL o

modelo BMF apresentou-se superior (8 cm) em altimetria, apenas na inicialização das 12 h (época da análise). O modelo BMF aplicado à estimativa da componente 2D apresentou melhor ou qualidade igual em todos os casos. De forma geral a BMF apresentou melhores resultados ao ser aplicada na estimativa do atraso, e principalmente nas épocas após a análise do modelo WRF (as 12h). Logo, para posicionamento de alta acurácia, no posicionamento estático (na maioria dos casos e duas estações), o BMF se apresentou superior ou igual, em relação as discrepâncias e precisão do PPP de todas as componentes (E, N, U), em ambas as estações (NAUS e POAL) tendo como contrapartida a estimativa com o VMF1, exceto para a discrepância altimétrica do modelo BMF na estação NAUS (Tabelas 14 e 15).

Em relação ao tempo de convergência (inferior à 10 cm em discrepância e precisão), com 24h de dados processado, empregando os modelos (BMF e VMF1) em NAUS a componente altimétrica (U) requeriu 2h30min à mais para convergir que a planimétrica, e após esse período houve degradação da qualidade, voltando a convergir as 18h. Nas estimativas dos modelos a convergência ocorreu com 18 min, porém após uma degradação convergiu as 17h. Em POAL os modelos convergiram cerca de 4h depois do início em planimetria. Porém, na altimetria não convergiu, permaneceu com 40 cm de discrepância. A convergência das estimativas dos modelos ocorreu nos 40 min iniciais, mas a componente altimétrica apresentou degradação do posicionamento (20 cm) após as 15h.

Quando foi avaliada a época de inicialização (12h-18h) após a análise do WRF (12h), o modelo BMF apresentou semelhança com o VMF1; em NAUS o modelo BMF apresentou 2h à mais para convergir, que o VMF1. Em relação à estimativa dos modelos BMF em NAUS foi semelhante ao VMF1 (45 min), já POAL na estimativa com BMF apresentou tempo de convergência mais rápido, 30 min em relação à VMF1 (1h30min).

Embora a BMF seja desenvolvida a partir da PNT regional com o modelo operacional no CPTEC de maior resolução espacial e temporal e o WRF apresente alta qualidade na previsão do atraso (seção 5), no PPP (seção 6) esse resultado nem sempre foi mantido. Foi observado que a VMF1, que considera o modelo europeu (ECMWF), em alguns casos obteve resultados superiores (principalmente no PPP estático). O que pode ser devido ao fato de que o modelo VMF1 é obtido a partir de duas análises do ECMWF; já os dados aplicados nessa tese foram referentes à análise das 12h. Por essa razão, um novo experimento foi proposto analisando diferentes épocas de inicialização a cada 6h. Assim, foi possível verificar que, após a análise de 12h do WRF, os resultados foram mais promissores para a função desenvolvida,

principalmente em relação à estimativa. No entanto, para resultados no PPP mais conclusivos deverá ser considerado um número expressivo de processamentos PPP.

Logo, diante das análises apresentadas, a BMF apresentou resultados promissores quanto ao atraso em relação as radiossondas (referência), além da boa acurácia obtida no PPP, o que indica a qualidade dessa função no posicionamento de alta acurácia pós-processado, que também poderá ser aplicado em tempo real. Finalizando, a partir do desenvolvimento da BMF, será possível realizar mais investigações sobre a qualidade e aplicações dessa função. Assim, algumas recomendações são sugeridas a seguir.

## 7.2 Recomendações

As recomendações para trabalhos futuros são:

- Avaliar a qualidade da BMF no PPP considerando um período maior de dados, além de mais regiões do Brasil;
- Realizar o processamento dos novos dados (a partir de 2017) do WRF na modelagem da BMF, que atualmente se encontra operacional no CPTEC/INPE, o que possibilitaria avaliações mais robustas da BMF, em mais de uma série anual;
- Disponibilizar a BMF para aplicações sobre o território brasileiro;
- Avaliar a magnitude do atraso zenital e inclinado no território brasileiro para um maior número de estações (como a região nordeste);
- Considerar na modelagem da BMF as duas análises diárias (00h e 12h UTC) atualmente operacionais (desde setembro de 2018) no CPTEC/INPE, com o intuito de avaliar a qualidade da função desenvolvida a partir de duas análises, uma vez que os melhores resultados da BMF foram obtidos após as 12h (hora de análise utilizada);
- Realizar uma ampla avaliação da correlação do atraso a partir da BMF com as variáveis atmosféricas;
- Realizar uma versão da BMF que disponibilize além do parâmetro  $a$  da função de mapeamento, também os parâmetros  $b$  e  $c$  que considerem a realidade climatológica brasileira;
- Investigar e realizar melhorias na variação azimutal e altimétrica da BMF, devido ao problema de referencial altimétrico entre o modelo de PNT e o geoide, considerando os avanços do grupo em Sistemas de Coordenadas e modelos de PNT da IAG (IAG IC-SSG12).

## REFERÊNCIAS

- ABREU, P. A. G.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. Modelos de Previsão Numérica do Tempo: Aplicação e Avaliação no Posicionamento Absoluto. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.66/3, 2014.
- ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Modelagem Dinâmica do ZTD Versus Modelo de Hopfield: Resultados Obtidos Utilizando o Conceito de Estação Virtual. In: *Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA*, São José dos Campos, 2006a.
- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A.; SAPUCCI, L. F.; CAMARGO, P. O. VRS Concept Using NWP and Mod\_Ion\_FK: Preliminary Results in Brazil. In: *International FIG Congress*, Munique, Alemanha, 2006b.
- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A. Aplicando Diferentes Técnicas para Gerar Dados de Pseudodistância de uma Estação Virtual. In: *XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia*, Rio de Janeiro, RJ, 2007a.
- ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Evaluating the Performance of the CPTEC-INPE/FCT-UNESP Troposphere Dynamic Model Using the VRS Concept. In: *2007 Joint Assembly*, Acapulco, México, 2007b.
- ALVES, D. B. M. Posicionamento Baseado em Redes de Estações de Referência GPS utilizando o Conceito de Estação Virtual. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente. São Paulo, 2008.
- ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; MARQUES, H. A.; SOUZA, E. M.; GOUVEIA, T. A. F.; MONICO, J. F. G.; MAGARIO, J. A. Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil. *GPS Solutions* (Heidelberg). 15(3):253–261, doi 10.1007/s10291-015-0477-x, 2015.
- AMS: Glossary of Meteorology. American Meteorological Society. Disponível em [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Ray\\_tracing](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Ray_tracing). Acesso em Fevereiro de 2019.
- ASKNE, J.; NORDIUS, H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Sci.* 22(3), 379–386, 1987.
- BEVIS M, BUSINGER S, HERRING TA, ROCKEN C, ANTHES RA & WARE RH. GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophys Research*. Vol. 97: 15787–15801, 1992.
- BOEHM, J., AND H. SCHUH. Vienna Mapping Functions. In *Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, Leipzig, May 9–10, 2003.

BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31 L01603, doi:10.1029/2003GL018984, 2004a.

BOEHM, J. Troposphärische Laufzeitverzögerungen in der VLBI. Dissertation, Institut für Geodäsie und Geophysik, TU Wien, 2004b.

BOEHM, 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*. Vol. 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629, 2006a.

BOEHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on data from numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*. L07304,doi: 10.1029/2005GL025546, 2006b.

BOEHM, J.;SCHUH, H.; URQUHART, L.; STEIGENBERGER, P.; SANTOS, M. C. Troposphere delay modeling based on Numerical Weather Models. 3<sup>rd</sup> International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, European Space Agency, 31 August – 2 September, 2011. Copenhagen, Denmark, 2011.

CAMARGO, P. O. Modelo regional da ionosfera para uso em receptores de uma frequência. 191pg. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

CEIC - Centro Integrado de Comando. Disponível em: [http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?p\\_secao=28](http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?p_secao=28). Acesso em: 02 de abril de 2019.

CPTEC/INPE. Nota da coordenação-geral do CPTEC/INPE sobre a implementação operacional do modelo regional operacional do CPTEC - modelo regional WRF, 2018. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/129977>.

DALBELO, L. F. A; ALVES, D. B. M; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Minimizando o atraso zenital troposférico no posicionamento DGPS: comparação da modelagem dinâmica com o modelo de Hopfield. Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia – SBGEA. São José dos Campos – SP, 2006.

DAVIS, J. L.; HERRING, T. A.; SHAPIRO, I.; ROGERS, A. E.; ELGENED, G. Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. *Radio Science*, v. 20, 1985.

DEAKIN, R.E. KILDEA, D.G. A note on standard deviation and rms. *The Australian surveyor*, Vol. 44, No. 1, pp. 74-79, 1999.

ESSEN, L.; FROOME, K.D. Dielectric constant and refractive index of air and its principal constituents at 24,0000 Mc/s, *Nature* 167, 512–513 (1951)

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. 2 ed. 430 p. Ed. UFPR, Curitiba, 2015.

GGOS. Global Geodetic Observing System. <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/delay.html>. Acesso em: fevereiro de 2019.

GONÇALVES, L. G. G. Uso da técnica de relaxação de Newton para assimilação de dados de satélite em um modelo de área limitada. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. São Paulo, 1999.

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.136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente. São Paulo, 2013.

GOUVEIA, T. A. F.; SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M. Avaliação Robusta da Modelagem Neutrosférica Sobre o Território Brasileiro Baseada em Modelos de Previsão Numérica de Tempo da América Do Sul. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 20, no 3, p.481-503, jul-set, 2014.

GREGORIUS T. How it Works...GIPSY-OASIS II. Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, Canadá, 1996.

HASE, F.; Höpfner, M. Atmospheric ray path modeling for radiative transfer algorithms. Appl. Opt., Vol. 38, No. 15, pp. 3129–3133, 1999. DOI:10.1364/AO.38.003129.

HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A.; FERREIRA, S. H. S.; ANDREOLI, R. V.; SAPUCCI, L. F.; MATTOS, J. G. Z. Assimilação de dados no CPTEC/INPE. Instituto Nacional de Pesquisa e Espaciais – INPE, v.1, 2007.

HERRING, T. A. Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. Proceedings of the Symposium Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, eds. J. C. de Munck, and T. A. TH. Spoelstra, No. 36, Netherlands Geodetic Commission, The Hague, The Netherlands, May 19–22, ISBN 9789061322436, pp. 157–164, 1992.

HOBIGER, T., R. ICHIKAWA, Y. KOYAMA, and T. KONDO. Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models. Journal of Geophysical Research, Vol. 113, No. D20, doi:10.1029/2008JD010503, 2008a.

HOBIGER, T., R. ICHIKAWA, Y. KOYAMA, and T. KONDO. Ray-traced troposphere slant delays for precise point positioning. Earth, Planets and Space, Vol. 60, No. 5, pp. e1–e4, 2008b.

HOPFIELD, H. S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. Journal of Geophysical Research, Vol. 74, No. 18, pp. 4487–4499, 1969.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento->



[geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e](http://geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e). Acesso em: Maio de 2019.

IERS. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Conventions 2010. Disponível em: <<http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>>. Acesso em: Maio de 2019.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>. Acesso em: Abril de 2019.

JACOB DANIEL J. Introduction to atmospheric chemistry. Harvard University. Jan, 1999.

LANYI, G., Tropospheric Delay Affecting in Radio Interferometry. Telecommunications and Data Acquisition Progress Rep. Jet Propulsion Laboratory Pasadena. CA, April-June, 1984.

LANDSKRON, D; BOHEM, J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. J Geod (2018) 92: 349. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>.

LIMA, T. M. A. Modelagem troposférica: estudo e análise de diferentes modelos. Relatório FAPESP de Iniciação Científica, 2019.

MACHADO, L. A. et al. The CHUVA Project - how does convection vary across Brazil? Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 4, p. 140402075932004, 2014.

MARINI, J. W. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. Radio Science, Vol. 7, No. 2, pp. 223–231, 1972. DOI:10.1029/RS007i002p00223.

MARQUES, H. A; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. RINEX\_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. In: GPS Solutions, v. 15, p. 305-314, 2011.

MARQUES, H. A. PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente. São Paulo, 2012.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A. S.; AQUINO, M. análise dos efeitos ionosféricos de ordem superior no ciclo solar 24 e influência no posicionamento GNSS absoluto. Boletim de Ciências Geodésicas, 20(4), 879-901, 2014. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702014000400049>

MENDES, V. B. (1999). Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques. Ph.D. thesis, University of New Brunswick, Dept. of Geodesy and Geomatics Engineering, Fredericton, N.B., Canada, April, 349 pp., Technical Report 199, <http://gge.unb.ca/Pubs/TR199.pdf>.

MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. Observations and Least Squares. University Press of America, 497 p, 1976.

MONICO, João. F. G. GNSS: investigações e aplicações no posicionamento geodésico, em estudos relacionados com a atmosfera e na agricultura de precisão. Projeto FAPESP na modalidade temático. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, SP, 2006.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 1.ed. Editora UNESP. São Paulo, 2008.

MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M.C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 15, n.3, 2009.

NAFISI, V.; URQUHART, L.; SANTOS, M.; NIEVINSKI, F.; BOHM, J.; WIJAYA, D.; SCHUH, H; ARDALAN, A.; HOBIGER, T.; ICHIKAWA, R.; ZUS, F.; WICKERT, J.; GEGOUT, P. Comparison of Ray-Tracing Packages for Troposphere Delays. IEEE T. Geoscience and Remote Sensing. 50. 469-481. 10.1109/TGRS.2011.2160952, 2012.

NIELL, A. E. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. Journal of Geophysical Research. v. 101, n.B2, 1996.

NIELL, A. E. Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. Earth Planets Space. v. 52, 699-702, 2001 (a).

NIELL, A. E. Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models. The Journal of Physical and Chemistry. Earth, v.26, 2001 (b).

NIELL, A.; PETROV, L. Using a Numerical Weather model to improve Geodesy. In: The State of GPS Vertical Positioning Precision, Luxembourg, 2003.

NIEVINSKI F.G. Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS. 230f. Dissertação (MSc). University of New Brunswick. Canada, 2009.

NIEVINSKI, F. G; SANTOS, M. C. Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS, Geomatica, vol. 64, no. 2, pp. 191-207, 2010.

OLIVEIRA, A. F. Análise Comparativa de Diferentes Modelos Troposféricos para RTK em Rede Usando o Conceito de Estação de Referência Virtual. 177p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Paraná, 2013.

OLIVEIRA, A. F.; ALVES, D. B. M.; FERREIRA, L. D. D. Análise de Modelos Troposféricos no Posicionamento Baseado em Redes Usando o Conceito de VRS. Boletim de Ciências Geodésicas. Vol 20/1, 2014a.

\_\_\_\_\_. Avaliação de Diferentes Modelos Troposféricos de Previsão Numérica de Tempo no Posicionamento em Redes. Revista Brasileira de Cartografia, v.66/3, 2014b.

OLIVEIRA JUNIOR, P. S.; ALVES, D B M.. Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico no posicionamento GNSS de alta acurácia. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente. São Paulo, 2015.

ROCKEN, C., S. SOKOLOVSKIY, J. M. JOHNSON, HUNT D. Improved mapping of tropospheric delays. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 18, No. 7, pp. 1205–1213, doi:10.1175/1520-0426, 2001.

RUEGER, J. M. (2002). Refractive index formulae for radio waves. FIG XXII International Congress, International Federation of Surveyors (FIG), Washington, D.C., April 19–26. [http://www.fig.net/pub/fig\\_2002/Js28/JS28\\_rueger.pdf](http://www.fig.net/pub/fig_2002/Js28/JS28_rueger.pdf).

ROFATTO, V. F. ZTD em Tempo Quase Real via Estações GNSS Terrestres: Estratégia de Processamento para o GIPSY-OASIS II e Combinação das Séries Temporais. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente. São Paulo, 2013.

SANTOS, M., MCADAM, M.; BOEHM, J. Implementation Status of UNB-VMF1. EGU General Assembly. Vienna, Austria, pp. 22- 27, 2012.

SAPUCCI, L. F. Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Presidente Prudente, 2001.

\_\_\_\_\_. Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Presidente Prudente, 2005a.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; SILVEIRA, R. B.; FISCH, G.; MONICO, J. F. G. Analysis of relative humidity sensors at WMO radiosonde intercomparison experiment in Brazil. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 22, 664–678, 2005b.

SAPUCCI, L. F., MACHADO, L. A. T., MONICO, J. F. G. Previsões do atraso zenital troposférico para a América do Sul: variabilidade sazonal e avaliação da qualidade. *Revista Brasileira de Cartografia*. No 58/03, Dezembro 2006. (ISSN 1808-0936)

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ADAMS, D. K.; ROSA, G.P.S.; SCHUBERT, D. V.; VITORELLO, I. Evolução do GNSS Meteorologia no Brasil Beneficiando a Previsão Numérica de Tempo sobre a América do Sul. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belem-PA. Anais..., 2010.

SAPUCCI, L. F.; BASTARZ, C. F.; CERQUEIRA, F.; AVANÇO, L. A.; HERDIES, D. L. Impacto de perfis de Rádio Ocultação GNSS na qualidade das previsões de tempo do CPTEC/INPE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, n.4, 551 - 567, 2014.

- SÁNCHEZ, L. SIRGAS reference frame realization SIR17P01, Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut DGFI-TUM, IGS RNAAC SIRGAS, 2017.
- SEEBER, G. Satellite geodesy: foundations, methods, and applications. 2nd completely revised and extended edition. Walter de Gruyter. Berlin, New York, 2003.
- SERON, F. J.; GUTIERREZ D.; GUTIERREZ, G.; CERESO, E. Implementation of a method of curved ray tracing for inhomogeneous atmospheres. *Computers & Graphics*, Vol. 29, No. 1, pp. 95–108, 2005. DOI:10.1016/j.cag.2004.11.010.
- SETTI JR, P. T.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. Uso Integrado dos Sistemas Galileo e GPS: Uma Análise da Acurácia no Posicionamento Por Ponto com Correções Atmosféricas. *RBC. Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, v. 68, p. 595-607, 2016.
- SPIPKER, J., J. JR. Tropospheric Effects on GPS. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Vol 1 Capítulo 13, pg. 517 – 546, 1994.
- SILVA, N. C. C., SANTOS, M. C., OLIVEIRA, L. C. Efeito da refração troposférica no posicionamento geodésico com GPS. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 17(2,3), 1999.
- SNYDER, J. P. Map projections - a working manual. U.S. GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 1395. Supersedes USGS Bulletin 1532, 1926.
- SMART, W. M. *Spherical Astronomy*. 6. Ed. Cambridge University Press, 1977.
- SPENCER, G. H.; MURTY, M. V. R. K. General ray-tracing procedure. *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 52, No. 6, pp. 672–676, 1962. DOI:10.1364/JOSA.52.000672.
- STAM, J.; LANGU'ENOU, E. Ray tracing in non-constant media. *Proceedings of the Eurographics Rendering techniques '96 workshop*, eds. X. Pueyo, and P. Schröder, Springer-Verlag, Porto, Portugal, June 17–19, ISBN 3-211-82883-4, pp. 225–234, 1996. <http://www.dgp.toronto.edu/people/stam/reality/Research/pdf/wobble.pdf>.
- THAYER, G. D. An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Sci.*, vol. 9, no. 10, pp. 803-807, 1974. DOI: 10.1029/RS009i010p00803
- TEUNISSEN, P. J. G; MONTENBRUCK, O. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer Handbooks. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1%202017
- UNB-VMF1. University of New Brunswick Vienna Mapping Function Service (Univ. New-Brunswick, Fredericton), 2019. Disponível em: <http://unb-vmf1.gge.unb.ca/>. Acesso em: Maio de 2019.
- URQUHART, L.; SANTOS, M.; NIEVINSKI, F.; BOEHM, J. Generation and assessment of VMF1-Type Grids using North-American Numerical Weather Models. *International Association of Geodesy Symposia*. 139. 3-9. 10.1007/978-3-642-37222-3\_1, 2014.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa: Editora UFRV, 448 p., 2000.

VENDRASCO, E. P.; SAPUCCI, L. F.; KHAMIS, E. G.; MATTOS, J. G. Z.; AVANÇO, L. A.; BAÑOS, I. H.; CAMPOS, T. L. O. B.; GONÇALVES, L. G. G. Sistema de modelagem regional (SMR) versão 2.0 (Olímpica). Relatório Técnico, INPE, São José dos Campos, 2016.

VMF1. Vienna Mapping Functions Open Access Data. Disponível em: [http://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop\\_products/GRID/2.5x2/VMF1/](http://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GRID/2.5x2/VMF1/). Acesso em: Maio de 2019.

WALLACE JOHN M, HOBBS P. V. Atmospheric Science: An introductory survey. University of Washington, 2nd ed, 2005.

van der WERF, S. Y. Ray tracing and refraction in the modified US1976 atmosphere. Appl. Opt., Vol. 42, No. 3, pp. 354–366, 2003. DOI:10.1364/AO.42.000354.

WRF/UCAR. Weather Research and Forecasting (WRF). Disponível em: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>. Acesso em: Março de 2019.