

FRANCIELE LÚCIA SILVA BRAGA

**EFEITOS DA REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA NO POSICIONAMENTO POR  
PONTO PRECISO NO BRASIL**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção do  
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

B813e  
2018  
Braga, Franciele Lúcia Silva, 1993-  
Efeitos da refração troposférica no posicionamento por  
ponto preciso no Brasil / Franciele Lúcia Silva Braga. – Viçosa,  
MG, 2018.  
xv, 118f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: William Rodrigo Dal Poz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 83-94.

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Troposfera.  
3. Geodésia. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento  
de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil. II. Título.


CDD 22. ed. 526.1

FRANCIELE LÚCIA SILVA BRAGA

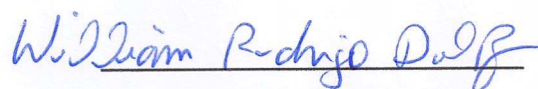
**EFEITOS DA REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA NO POSICIONAMENTO POR  
PONTO PRECISO NO BRASIL**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, para obtenção do  
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2018

  
Afonso de Paula dos Santos

  
Eder Teixeira Marques

  
William Rodrigo Dal Poz  
(Orientador)

## DEDICATÓRIA

*A Deus, meus pais Vicente e Vera (in memoriam)  
que me apresentaram ao caminho da persistência,  
e ao meu amor Rodrigo  
companheiro de todas as horas.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por toda força concedida na concretização desse sonho.

A minha família, em especial meu pai Vicente, por estar sempre presente apoiando e incentivando cada passo da minha vida. A minha irmã Valnara pelos conselhos e todo apoio, e a minha linda sobrinha Sophia que sempre me encanta com sua ternura.

A minha mãe Vera (in memoriam), que infelizmente não pode estar presente neste momento tão feliz da minha vida. Obrigada por tudo!

Ao Rodrigo pelo carinho, compreensão, paciência, companheirismo, e pelo apoio nos momentos difíceis.

Ao professor William pela orientação, atenção, incentivo e amizade durante toda a realização deste trabalho.

Aos demais professores do Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica – UFV pela excelência no ensino: Antônio Santana Ferraz, Nilcilene das Graças Medeiros, Dalto Domingos Rodrigues, Júlio Cesar de Oliveira, Afonso de Paula dos Santos, Éder Teixeira Marques, Ítalo Ferreira e Marcos Vinicius Sanches Abreu e aos funcionários Cilene Knauf, Eduardo Fontes, Tiago Lopes e Geraldo Faria.

Aos amigos da Pós, em especial a Juliette, Sidmar, Lucas, Youlia, Raiane, Matheus, Jairo, Iann, Marília, Gabriel, Alessandra, Francisco, Layane, Jayme, Keevyn, Priscila, Marcos, e Rodrigo por compartilharem de momentos de estudos, descontração e desesperos.

A UFV pela estrutura e oportunidade, através do Departamento de Engenharia Civil, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que disponibilizaram seus equipamentos, instalações e aplicativos computacionais, e ao IBGE pela disponibilidade dos dados da RBMC.

A CAPES pelo apoio financeiro através do consentimento da bolsa de estudos.

## EPÍGRAFE

***“Não deixem que lhe façam pensar que você não é capaz de fazer algo porque essa pessoa não consegue fazer. Se você deseja alguma coisa, se quer realmente, lute por isso. Ponto final!”***

***Chris Gardner (Will Smith).***

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>5</b>
<b>3. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>6</b>
<b>4. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>8</b>
<b>4.1. Posicionamento GNSS .....</b>	<b>8</b>
4.1.1. Observáveis básicas GNSS .....	8
4.1.2. Posicionamento por Ponto .....	11
<b>4.2. Troposfera .....</b>	<b>15</b>
4.2.1. Modelagem da refração troposférica .....	21
4.2.1.1. Modelo de Saastamoinen .....	22
4.2.1.2. Modelo de Hopfield.....	23
4.2.1.3. Modelo Global de Previsão Numérica de Tempo do ECMWF .....	24
4.2.1.3.1. Modelo Global de Pressão e Temperatura .....	25
4.2.2. Funções de Mapeamento.....	27
4.2.2.1. <i>Niell Mapping Function (NMF)</i> .....	28
4.2.2.2. <i>Vienna Mapping Function (VMF)</i> .....	31
4.2.2.3. <i>Global Mapping Functions (GMF)</i> .....	33

4.2.3.	Gradientes horizontais troposféricos .....	33
4.3.	Sistemas de referência geodésicos modernos .....	36
4.4.	Transformação de referenciais e atualização de Coordenadas .....	41
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
5.1.	Materiais e Área de Estudo .....	43
5.2.	Metodologia.....	46
6.	RESULTADOS E ANÁLISES.....	55
6.1.	Avaliação da acurácia das coordenadas estimadas.....	55
6.1.1.	Acurácia da resultante planimétrica.....	56
6.1.2.	Acurácia altimétrica .....	63
6.2.	Avaliação do comportamento da acurácia altimétrica por estação do ano e região geográfica .....	72
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
	APÊNDICES.....	95

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resumo dos sinais GPS.....	9
Figura 2 - Atraso da trajetória do sinal devido aos efeitos da refração troposférica. .....	15
Figura 3 - Variação do atraso troposférico em função do ângulo zenital ( $^{\circ}$ ) de acordo com o modelo modificado de Hopfield. ....	17
Figura 4 - Componente úmida estimada (ZWD) no software Bernese GNSS. .	19
Figura 5 - Umidade (%) para a estação SAGA no mês de agosto de 2016....	20
Figura 6 - Umidade (%) para a estação UFPR no mês de agosto de 2016. ....	20
Figura 7 - Atraso troposférico total (ZTD), em metros.....	21
Figura 8 - Exemplo de um grid de coeficientes VMF1. ....	33
Figura 9 - Inclinando o zênite troposférico no ângulo $\beta$ . ....	35
Figura 10- Figura ilustrativa do referencial terrestre. ....	37
Figura 11 - Rede de Referência Contínua SIRGAS.....	40
Figura 12 - Espacialização das estações GNSS no Brasil.....	44
Figura 13 - Espacialização das estações GNSS por região geográfica. ....	45
Figura 14 - Fluxograma da metodologia aplicada neste estudo. ....	46
Figura 15 - Fluxograma do processo de transformação de referencial e atualização das coordenadas de referência. ....	53
Figura 16 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 1.....	56
Figura 17 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 2.....	57
Figura 18 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 3.....	57
Figura 19 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 4.....	58
Figura 20 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 5.....	59
Figura 21 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 6.....	59

Figura 22 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 7.....	60
Figura 23 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 8.....	61
Figura 24 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 9.....	61
Figura 25 - Resumo do desempenho de cada modelo troposférico a priori em relação a acurácia planimétrica. ....	62
Figura 26 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 1.....	64
Figura 27- Novo histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 1. ....	64
Figura 28 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 2.....	65
Figura 29 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 3.....	65
Figura 30 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 4.....	66
Figura 31 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 5.....	67
Figura 32 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 6.....	67
Figura 33 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 7.....	68
Figura 34 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 8.....	68
Figura 35 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 9.....	69
Figura 36 - Resumo do desempenho de cada modelo troposférico a priori em relação a acurácia altimétrica. ....	70
Figura 37- RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 1. ....	73
Figura 38 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 2. ....	73
Figura 39 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 3. ....	74
Figura 40 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 4. ....	75
Figura 41 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 5. ....	75
Figura 42 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 6. ....	76
Figura 43 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 7. ....	77
Figura 44 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 8. ....	77
Figura 45 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 9. ....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns pacotes de softwares PPP disponíveis. ....	14
Tabela 2 - Coeficientes para NMF. ....	30
Tabela 3 - Parâmetros hidrostáticos da VMF1.....	32
Tabela 4 - Descrição do número de estações GNSS por região .....	45
Tabela 5 - Períodos selecionados para o processamento em cada estação do ano.....	47
Tabela 6 - Parâmetros de processamento no software BERNESE GNSS 5.2 ..	48
Tabela 7- Estratégias de processamento para mitigação do atraso troposférico. ....	49
Tabela 8 - Estatísticas descritivas da acurácia planimétrica por estratégia de processamento. ....	63
Tabela 9 - Estatísticas descritivas da acurácia altimétrica por estratégia de processamento .....	71
Tabela 10 - Coordenadas cartesianas, ITRF 2008 - Época 2016,096 (Verão) .....	95
Tabela 11 - Coordenadas cartesianas, ITRF 2008 - Época 2016, 344 (Outono) .....	98
Tabela 12 - Coordenadas cartesianas, ITRF 2008 - Época 2016,598 (Inverno) .....	100
Tabela 13 - Coordenadas cartesianas, ITRF 2008 - Época 2016, 956 (Primavera).....	103

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIUB	<i>Astronomical Institute of the University of Bern</i>
APPS	<i>Automatic Precise Positioning Service</i>
ANTEX	<i>Antenna Exchange Format</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
BIH	<i>Bureau International de l'Heure</i>
BSW	<i>Bernese GNSS Software</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
CPTEC	<i>Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos</i>
CSRS-PPP	<i>Canadian Spatial Reference System</i>
CTP	<i>Conventional Terrestrial Pole</i>
DCB	<i>Differential Code Biases</i>
DORIS	<i>Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite</i>
DOY	<i>Day of Year</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GAPS	<i>GPS Analysis and Positioning Software</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnay Sputnikovaya Sistema</i>
GMF	<i>Global Mapping Function</i>

GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPT	<i>Global Pressure and Temperature</i>
GPT2w	<i>Global pressure and temperature 2 wet</i>
GPT3	<i>Global Pressure and Temperature 3</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGN	<i>Institut National de L'Information Géographique et Forestière</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IMF	<i>Isobaric Mapping Functions</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRM	<i>International Reference Meridian</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NMF	<i>Niell Mapping Function</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
PNT	Previsão Numérica de Tempo
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso

QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RINEX	<i>Receiver Independent EXchange Format</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SBAS	<i>Space-Based Augmentation System</i>
SINEX	<i>Solution INdependent EXchange format</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLR	<i>Satellite Laser Range</i>
UNAVCO	<i>University NAVstar Consortium</i>
UNB	<i>University of New Brunswick</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VEMOS	<i>VELOCITY Model Of Sirgas</i>
VLBI	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>
VMF	<i>Vienna Mapping Function</i>
VMF1	<i>Vienna Mapping Function 1</i>
VMF3	<i>Vienna Mapping Function 3</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
ZHD	<i>Zenith Hydrostatic Delay</i>
ZTD	<i>Zenith Tropospheric Delay</i>
ZWD	<i>Zenith Wet Delay</i>

## RESUMO

BRAGA, Franciele Lúcia Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Efeitos da refração troposférica no Posicionamento por Ponto Preciso no Brasil**. Orientador: William Rodrigo Dal Poz.

Um das técnicas para o processamento das observáveis GNSS, com resultados satisfatórios, é o PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). No entanto, a maioria das fontes de erros envolvidas nesta metodologia precisam ser modeladas, ao contrário do que ocorre com o método de posicionamento relativo. Quando são utilizados receptores de duas frequências, uma das fontes de erros mais importantes no PPP se refere à troposfera. O atraso zenital troposférico (ZTD - *Zenith Tropospheric Delay*), ou refração troposférica, é a principal fonte de erro no posicionamento com GNSS devido à troposfera. Destaca-se que há poucos estudos que comparam os modelos de correção da refração troposférica associados às funções de mapeamento em levantamentos no território brasileiro. Essa pesquisa tem como objetivo principal analisar diversos modelos de refração troposférica e funções de mapeamento no processamento PPP no Brasil, assim como sua influência na acurácia planimétrica e altimétrica das coordenadas finais estimadas. Para tanto, foram investigados os modelos troposféricos de Saastamoinen, Niell, Hopfield, Saastamoinen baseado nos dados de atmosfera do modelo GPT (*Global Pressure and Temperature*), e o modelo de Previsão Numérica de Tempo do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), aliados as funções de mapeamento de  $\frac{1}{\cos Z}$ , Niell, Hopfield, GMF (*Global Mapping Function*), e VMF1 (*Vienna Mapping Function 1*), disponíveis no software científico BERNESE v. 5.2. Além disso, foi avaliado uma estratégia sem correção a priori do atraso troposférico hidrostático. Os estudos foram realizados nas cinco regiões geográficas do Brasil, e nos períodos de quinze dias para cada estação do ano. Pôde-se constatar que, em relação à acurácia da resultante planimétrica, os modelos de refração troposférica apresentaram resultados similares. Já para a componente altimétrica, o modelo Hopfield não apresentou um desempenho

semelhante as outras estratégias de processamento. Além disso, os valores de RMS da acurácia altimétrica apresentaram valores maiores para estações GNSS localizadas na região Norte, principalmente na primavera. Os menores RMS de acurácia altimétrica foram alcançados para estações localizadas na região Sul, na primavera.

## ABSTRACT

BRAGA, Franciele Lúcia Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Effects of tropospheric refraction in Precise Point Positioning in Brazil**. Advisor: William Rodrigo Dal Poz.

One of the GNSS observable processing technique, with satisfactory results, is the PPP (Precise Point Positioning). However, the majority of error sources involved in this methodology needs to be modeled, unlike of what happens with the relative positioning method. When double frequency receptors are used, one of the most important source of error in PPP is due to the troposphere. The Zenith Tropospheric Delay (ZTD), or tropospheric refraction, is the main source of error in GNSS positioning due to the troposphere. It stands out that there are few studies that compares tropospheric refraction correction models associated to mapping functions on surveys done on Brazilian territory. This research's main objective is to analyze various tropospheric refraction in PPP processing in Brazil, as well as its influence on the final planimetric and altimetric coordinates' accuracy. For this, were investigated the tropospheric models of Saastamoinen, Niell, Hopfield, Saastamoinen based on the GPT (Global Pressure and Temperature) model, and the ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts), allied to the mapping functions of  $1 / (\cos Z)$ , Niell, Hopfield, GMF (Global Mapping Function), and VMF1 (Vienna Mapping Function 1), available in BERNese v. 5.2. In addition, a strategy without a priori correction of the hydrostatic tropospheric delay was evaluated. Studies were done for Brazil's five geographic regions, for 15 days of each season. It was verified that, regarding the planimetric resultant's accuracy, the tropospheric refraction models showed similar results. For the altimetric component, the Hopfield model did not show similar performance compared to other processing strategies. Moreover, RMS values for the altimetric accuracy were bigger on GNSS station located on the North region, especially during spring. The lower RMS values for altimetric accuracy were achieved on stations located on the south region, on spring.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o advento do Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*), novas perspectivas para levantamentos e mapeamentos surgiram, sendo possível obter as coordenadas de qualquer local na superfície terrestre, em um sistema de referência global, com base em observações de satélites artificiais (SEEBER, 2003).

Em 1991, a ICAO (*International Civil Aviation Organization*) sugeriu o termo GNSS (*Global Navigation Satellite System*) na *10th Air Navigation Conference*, pois a navegação por satélite seria fornecida por mais de um sistema de navegação (HEIN, 2000 *apud* ALBARICI, 2011). Atualmente, o GNSS é uma das técnicas em destaque que compõem a Geodésia, sendo um conjunto de diversos sistemas de posicionamento. Dentre eles, o GPS e o GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), com as suas constelações completas, e aquelas em desenvolvimento como o Galileo e o BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*). Além desses, compõem o GNSS, os sistemas de expansão nomeados como o SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) e o GBAS (*Ground Based Augmentation System*); assim como, os sistemas regionais de navegação, tais como: o IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*), o QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), dentre outros (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008; ALVES et al., 2013; MONTENBRUCK et al., 2017).

Das técnicas de pós-processamento empregadas no posicionamento GNSS que proporcionam informações de posição com alta acurácia (poucos milímetros ou centímetros), essencialmente, têm-se o PPP, o Posicionamento Relativo e o Posicionamento em Rede (MONICO, 2008; ALVES et al., 2013, ALMEIDA, 2015). No entanto, os efeitos da atmosfera terrestre são certamente um dos fatores mais limitantes de acurácia para aplicações geodésicas baseadas em GNSS (FUND, 2009).

Neste sentido, a literatura científica sobre propagação dos sinais GNSS divide a atmosfera terrestre em duas camadas principais, a troposfera e a ionosfera. A ionosfera compreende a camada dispersiva para sinais micro-

ondas, localizada aproximadamente entre 50 e 1000 quilômetros acima da superfície terrestre. Já a troposfera (atmosfera neutra) é a parte mais baixa da atmosfera e se estende da superfície terrestre até uma altitude de cerca de 50 quilômetros. A propagação do sinal na troposfera depende principalmente da temperatura, pressão e teor de vapor de água das camadas atmosféricas. Além disso, no comprimento de onda do micro-ondas, a troposfera não é dispersiva (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Em relação à troposfera, a maior perturbação provocada nos sinais GNSS é o atraso troposférico, na ordem de 2,3 metros quando o satélite se encontra no zênite e a estação ao nível do mar em condições atmosféricas padrão (DACH et al., 2015). Já para um satélite próximo ao horizonte, o atraso do sinal causado pela troposfera é maximizado, chegando a ultrapassar os 20 metros. O atraso troposférico se refere ao atraso que o sinal eletromagnético leva para alcançar a antena do receptor GNSS, devido índice de refração dos gases constituintes da atmosfera ser maior que a unidade, diminuindo assim velocidade do sinal, e conseqüentemente aumentando o seu tempo de propagação (COLLINS, 1999).

Na literatura sobre GNSS o atraso troposférico é modelado como um produto do atraso troposférico zenital e um fator geométrico, denominado de função de mapeamento, que descreve a dependência do ângulo de elevação no atraso (NIELL, 1996). Assim, as funções de mapeamento em um determinado ângulo zenital (ou ângulo de elevação) projeta o atraso troposférico da direção do zênite ao longo da direção do satélite, que não está posicionado a nadir. Vários modelos de funções de mapeamento podem ser empregados para relacionar o atraso troposférico inclinado, tal como a função de mapeamento simples  $\frac{1}{\cos Z}$  (SAASTA MOINEN, 1972), adequada para ângulos zenitais até 70° (SAHA et al., 2010), tanto quanto as desenvolvidas por Marini (1972); Ifadis (1986); Herring (1992); Niell (1996); Foelsche e Kirchengast (2002); Böhm et al. (2006a), Böhm et al. (2006b) e Landskron & Böhm (2017), que foram desenvolvidas para ângulos zenitais maiores.

O atraso troposférico possui duas componentes principais: a hidrostática e a úmida. A componente hidrostática corresponde a 90% do atraso troposférico, e está relacionado aos gases secos presentes na atmosfera (HOFMANN-

WELLENHOF et al., 2008). Em vista disso, o atraso hidrostático zenital (ZHD – *Zenith Hydrostatic Delay*) é modelado com base na temperatura e pressão no local de observação que podem ser obtidos a partir de um modelo de atmosfera padrão ou de medições meteorológicas de superfície (KARABATIC, 2011). Na literatura é frequente trabalhos que utilizam o modelo modificado de Hopfield ou o modelo de Saastamoinen para redução dos efeitos da atmosfera neutra (SEEBER, 2003; MENDES, 1998).

Desta forma, não é difícil calcular a parte hidrostática do atraso troposférico, pois, há diversos modelos hidrostáticos troposféricos que utilizam parâmetros atmosféricos normalizados, medições meteorológicas de superfície ou parâmetros obtidos a partir de modelos como GPT (BÖHM et al., 2007).

Apesar do atraso zenital úmido (ZWD - *Zenith Wet Delay*) gerar uma influência menor do que a componente hidrostática, representando cerca de 10% do atraso troposférico zenital, é extremamente difícil modelar ou determinar a distribuição do vapor de água na atmosfera. Portanto, torna-se um fator crítico para a capacidade de corrigir o ZWD, uma vez que sua distribuição não é linear e nem homogênea, além da alta variabilidade temporal, chegando a 20% em poucas horas (TEUNISSEN & KLEUSBERG, 1998; SCHÜLER, 2001; SAPUCCI et al., 2004; WIELGOSZ et al., 2011).

No entanto, com base em períodos longos de coleta de dados pode-se modelar apenas a componente hidrostática, e estimar a componente úmida do ZTD com os outros parâmetros no ajustamento de observações GNSS (OLIVEIRA JÚNIOR, 2015). Portanto, o atraso troposférico pode ser tratado além de modelos matemáticos, empregando assim, processos estocásticos para estimar os resíduos dessa modelagem a partir das observações GNSS (SAPUCCI & MONICO, 2001a).

O software científico BERNESE GNSS conhecido por fornecer um alto padrão de qualidade para aplicações geodésicas, estima a componente úmida do atraso troposférico no ajustamento de observações, e utiliza um modelo a priori associado a uma função de mapeamento correspondente para determinar a componente hidrostática do atraso troposférico. O software também dispõe de

uma grande variedade de modelos de atraso troposférico e funções de mapeamento.

Destaca-se alguns trabalhos sobre impactos dos modelos troposféricos no posicionamento GNSS no Brasil em diferentes estações do ano, como os trabalhos realizados por Gouveia et al. (2017 e 2014), Chuerubim et al. (2016), Abreu et al. (2014), e Oliveira et al. (2014) e Silva et al. (1999). No trabalho de Churubin et al.(2016) foi avaliado os modelos empíricos de Hopfield e Saastamoinen no posicionamento relativo, em um software comercial, já Abreu et al. (2014) investigaram um modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) ETA15km no posicionamento absoluto. Oliveira et al. (2014) analisaram modelos troposféricos PNT no posicionamento em rede, sendo um regional disponibilizado pelo CPTEC/INPE - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, e um global disponibilizado pelo ECMWF. No trabalho de Gouveia et al. (2017) foi empregado os modelos PNT/CPTEC e Hopfield na análise de acurácia e tempo de convergência no PPP, empregando o software RT\_PPP, que realiza processamento de dados GPS em tempo real ou pós processados (MARQUES et al., 2014). No estudo elaborado por Gouveia et al. (2014) foi avaliado três modelos PNT, para território brasileiro, empregando a metodologia PPP no software científico GOA-II. Já Silva et al. (1999) analisaram os modelos Saastamoinen, Hopfield e Ifadis, combinados às funções de mapeamento de Ifadis, Hopfield, Saastamoinen, Herring e Lanyi, no posicionamento relativo.

Dentre os trabalhos mais recentes realizados no exterior envolvendo avaliação dos modelos troposféricos, ressaltam-se Mousa et al. (2016), que analisaram modelos de refração troposférica disponíveis na versão 5.0 do BERNESE, com solução em rede para algumas estações GNSS do Egito e do IGS (*International GNSS Service*). Já no estudo de Abdallah (2016) foi avaliado diferentes funções de mapeamento (NMF - *Niell Mapping Function*, GMF - *Global Mapping Function*, e VMF1 - *Vienna Mapping Function 1*) no PPP cinemático, em 45 estações do IGS. Wang & Li (2016) avaliaram acurácia de três modelos troposféricos (UNB3, Saastamoinen e Hopfield) e cinco funções de mapeamento no posicionamento PPP cinemático na China. Wielgosz et al. (2011) avaliaram diferentes estratégias para redução do atraso troposférico no posicionamento em

rede local, no software Bernese v.5.0. Em outro estudo, Wielgosz et al. (2012) avaliaram os modelos troposféricos de Hopfield, UNB3m, COAMPS, no posicionamento estático rápido para uma rede de escala média.

Nessas condições, com a inovação tecnológica, atualização de softwares de posicionamento mais robustos, além da disponibilização de dados de redes GNSS ativas ao público por órgãos do governo e/ou centros de pesquisa, surge o interesse de analisar o efeito do atraso troposférico no processamento de observações GNSS para as cinco regiões geográficas do Brasil, empregando assim diferentes modelos para refração troposférica disponíveis no software BERNESE GNSS v.5.2.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o efeito da refração troposférica no PPP em território brasileiro, e indicar a melhor estratégia para a redução dos atrasos troposféricos.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Visando atender o objetivo desse trabalho foram realizadas as seguintes atividades:

- Aplicar e testar os modelos disponíveis no software BERNESE v.5.2. para redução dos efeitos da refração troposférica nos sinais GNSS, sendo eles:
  - Saastamoinen;
  - Hopfield;
  - Modelo de Niell: baseia-se no modelo Saastamoinen em conjunto com a função de mapeamento de Niell;

- VMF1/ECMWF em que ZHD é calculado com base nos grids da VMF1 referentes aos dados de atmosfera fornecidos pelo ECMWF;
- GPT/GMF baseado nos dados de atmosfera do modelo GPT, usando o modelo Saastamoinen e a função de mapeamento GMF.
- Estimar as coordenadas das estações sem considerar um modelo a priori para correção do atraso troposférico;
- Elaborar uma rotina para transformação de referenciais e atualização de coordenadas;
- Calcular a acurácia da resultante planimétrica e altimétrica, de acordo com cada estratégia de processamento.
- Avaliar o RMS (*Root Mean Square*) da acurácia altimétrica para cada região do Brasil e para cada estação do ano.

### **3. JUSTIFICATIVA**

O atraso troposférico causa erros sistemáticos, diminuindo a acurácia das medições GNSS. Aliás, o mesmo está fortemente correlacionado com altitude estimada, afetando assim predominantemente acurácia da componente altimétrica (ROTHACHER, 2002). Desta forma, a atenuação dos atrasos troposféricos é crucial no posicionamento baseado nas observáveis GNSS.

Além disso, o número de aplicações GNSS é muito amplo, abrangendo desde a Geodésia, a Geodinâmica, a Agricultura de Precisão, a Aeronomia, a Meteorologia, a Navegação, etc. Desse modo, a tecnologia GNSS é indispensável para várias áreas do conhecimento (ALVES et al., 2013). Neste sentido, estudos relacionados ao comportamento dos sinais GNSS na atmosfera terrestre contribuem para o entendimento desta tecnologia.

Como exemplo, os valores ZWD estimados a partir de medições GNSS podem ser usados na previsão numérica do tempo (SAPUCCI, 2005). Aliás, a estimativa precisa da componente úmida do atraso troposférico é importante em

aplicações GNSS de alta acurácia, como RTK (*Real Time Kinematic*) e PPP. Entretanto, a determinação do ZWD não pode ser modelada consistentemente com precisão milimétrica por qualquer modelo empírico existente (MOUSA et al., 2016).

Nesta perspectiva, o software BERNESE GNSS (BSW) estima a componente úmida do atraso troposférico em conjunto com outros parâmetros no ajustamento, e utiliza um modelo a priori para calcular a componente hidrostática. Os gradientes troposféricos também podem ser estimados durante o processamento. À vista disso, como o BSW dispõem de diferentes modelos e funções de mapeamento para obtenção do atraso troposférico, torna-se viável uma pesquisa para analisar qual estratégia de processamento fornece a melhor acurácia nas coordenadas finais estimadas no PPP, para as diferentes regiões geográficas do Brasil.

Dentre os trabalhos referentes a avaliação de modelos troposféricos, tais como os desenvolvidos por Gouveia et al. (2017 e 2014), Chuerubim et al. (2016), Abreu et al. (2014), e Oliveira et al. (2014) e Silva et al. (1999), os mesmos não apresentaram resultados mais consistentes para identificação do modelo mais adequado para mitigação do atraso troposférico zenital no território brasileiro. Além disso, as metodologias empregadas nestes estudos, estão associadas a um período pequeno de dados, e ao um baixo número de estações de rastreamento GNSS, ou apenas avaliação de modelos PNT.

Desta forma, este trabalho também se justifica pela continuação de trabalhos desta natureza, objetivando analisar efeito da troposfera na acurácia do posicionamento GNSS no Brasil, e avaliar a melhor estratégia de processamento disponível no programa Bernese GNSS para o atraso troposférico no PPP.

## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

São descritos a seguir os conceitos empregados para realização do presente estudo, buscando esclarecer as definições utilizadas que serviram de base para os procedimentos metodológicos aplicados.

### **4.1. Posicionamento GNSS**

#### **4.1.1. Observáveis básicas GNSS**

No que se refere ao GNSS, as observáveis básicas para a determinação das coordenadas de um ponto são (MONICO, 2008):

- Pseudodistâncias, a partir dos códigos;
- Fase (ou diferença de fase) da onda portadora.

Tomando como exemplo a constelação GPS, os satélites transmitem dois sinais, o sinal da portadora L1 de frequência 1575,42 MHz, e o sinal da portadora L2 de frequência de 1227,60 MHz. Modulados pela portadora L1, estão os códigos C/A, cuja duração é de 1ms, e o código Y (referente ao código P criptografado) que dura uma semana. O código P também é modulado na portadora L2. Já superpostas as portadoras L1 e L2 constam também as mensagens de navegação (SEEBER, 2003).

Com a modernização do GPS, os satélites do Bloco IIF contam com a terceira portadora denominada L5 (1176,45MHz), que está modulada pelo código L5C. Já a portadora L2, está modulada pelo código P e o novo código civil L2C. Além disso, os satélites do Bloco III transmitirão um novo código civil na frequência L1, a L1C, similar ao código aberto Galileo, facilitando assim a integração entre estes sistemas (SANZ SUBIRANA et al., 2013). A Figura 1 resume os sinais de navegação GPS.

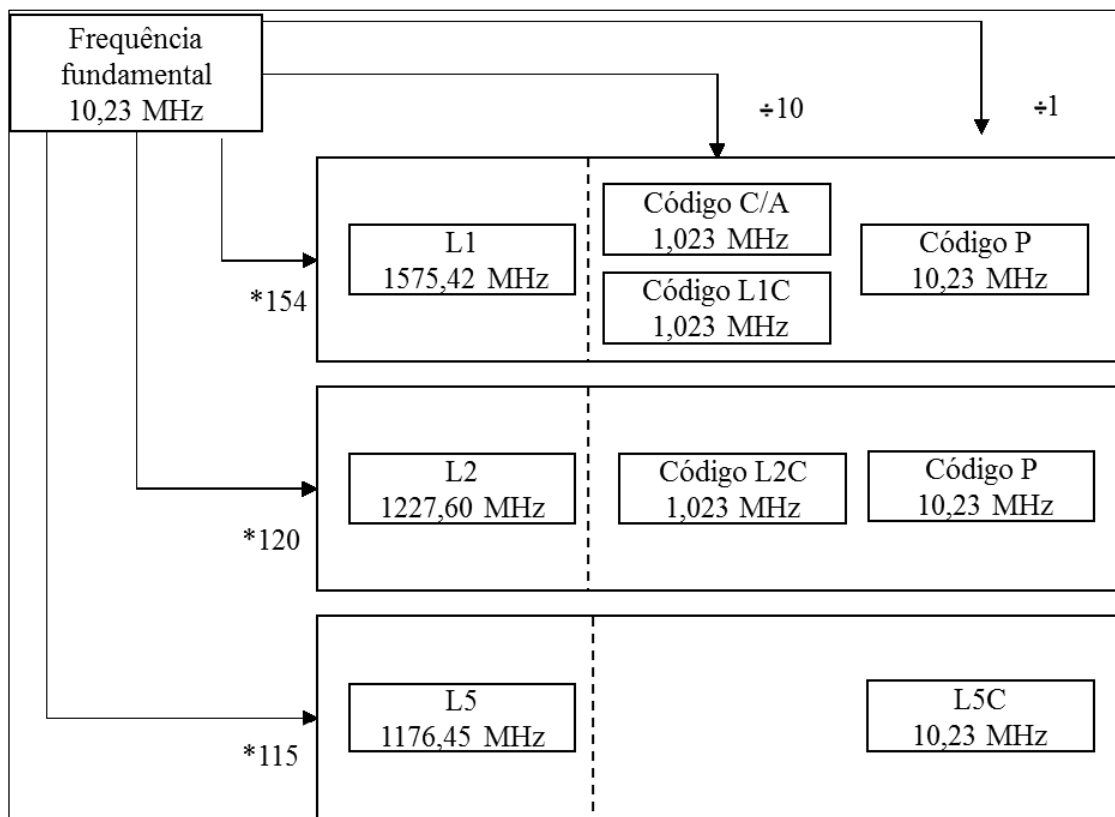


Figura 1 - Resumo dos sinais GPS.  
Fonte: (Adaptado de MONICO, 2008).

Enquanto no sistema GPS cada satélite transmite um código, utilizando assim a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), no sistema GLONASS a identificação dos satélites é realizada pela frequência do sinal a partir da técnica denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) (LEICK, 2004; MONICO, 2008). Atualmente, os satélites da terceira geração GLONASS transmitem os dados empregando a técnica CDMA.

A medição da distância baseada nos códigos se dá no retardo entre a chegada de uma transição particular do código gerada no satélite, e a sua réplica no código gerado pelo receptor. Esse retardo é o tempo de propagação do sinal entre o satélite e o receptor. Ao ser multiplicado pela velocidade da luz, obtém-se a pseudodistância, de acordo com a Equação (1), que recebe este nome devido ao não sincronismo do relógio do receptor (MONICO, 2008).

$$PD_r^s = \rho_r^s + d\rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{PD_r^s} \quad (1)$$

Em que:

- $PD_r^s$ : Observável pseudodistância;

- $\rho_r^s$ : Distância geométrica entre o centro de fase da antena do satélite (s) e do receptor (r);
- $d\rho_r^s$ : É o erro na distância geométrica, em metros (relacionado ao erro da órbita do satélite);
- $dt_r$ : Erro do relógio do receptor com relação ao sistema de tempo GPS;
- $dt^s$ : Erro do relógio do satélite com relação ao sistema de tempo GPS;
- $T_r^s$ : Erro sistemático devido à refração troposférica;
- $I_r^s$ : Erro sistemático devido à ionosfera;
- $dm_r^s$ : Efeitos de multicaminhamento entre a antena do satélite e antena do receptor;
- $\varepsilon_{PD_r^s}$ : Representa os erros aleatórios e demais erros sistemáticos não modelados na medida de pseudodistância; e
- $c$ : velocidade da luz no vácuo.

A fase da onda portadora ( $\phi_r^s$ ) é uma observável que oferece uma maior precisão em relação à pseudodistância. É igual à diferença de fase do sinal do satélite, recebido no receptor ( $\phi^s$ ) e a fase do sinal gerado no receptor ( $\phi_r$ ), ambas em um mesmo instante de recepção ( $t_r$ ). Os receptores, ao medirem o sinal, registram a parte fracionária da onda, restando um número inteiro de ciclos no instante inicial do rastreamento, denominado de ambiguidade ( $N_r^s$ ). A Equação (2) descreve a fase da onda portadora (MONICO, 2008).

$$\phi_r^s(t_r) = f \left( \frac{\rho_r^s + d\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s}{c} \right) + f * [dt_r - dt^s] + [\phi^s(t_0) - \phi_r(t_0)] + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r^s} \quad (2)$$

- $t_0$ : Instante da primeira observação;
- $t_r$ : Instante de recepção do sinal na estação r;
- $\phi_r^s(t_r)$ : Observável fase da onda portadora
- $f$  : É a frequência da portadora (L1 ou L2);

- $\phi^s(t_0)$ : Fase da portadora transmitida pelo satélite e recebida pela estação na época de referência  $t_0$ ;
- $\phi_r(t_0)$ : Fase gerada no receptor na época de referência  $t_0$ ;
- $N_r^s$  : Ambiguidade da fase entre o satélite e o receptor; e
- $\varepsilon_{\phi_r^s}$ : Representa os erros aleatórios e demais erros sistemáticos na medida da fase da onda portadora.

É importante destacar que o efeito da ionosfera é positivo no caso da pseudodistância e negativo para a fase da onda portadora. Em contrapartida, o efeito da troposfera é positivo para a fase e pseudodistância. Além disso, o efeito da troposfera é o mesmo para as portadoras L1, L2 e L5, ao contrário do que ocorre com a ionosfera.

#### 4.1.2. Posicionamento por Ponto

No posicionamento por ponto simples, ou posicionamento absoluto, é utilizado apenas um receptor GNSS, não sendo necessários dados de uma base de referência. As observáveis utilizadas neste método de posicionamento são as pseudodistâncias, utilizadas para estimar tanto as coordenadas do ponto quanto o erro de sincronismo do relógio do receptor, sendo assim necessários no mínimo, quatro satélites visíveis. Além disso, também é possível utilizar a fase de batimento da onda portadora quando disponível para mais de um instante de observação, visto que, para uma única época não proporciona solução (MONICO, 2008).

No posicionamento absoluto devido ao uso de efemérides transmitidas, o sistema de referência está vinculado ao sistema de posicionamento por satélite empregado, por exemplo, para o GPS é o WGS84 (*World Geodetic System*, 1984). A qualidade dos resultados é limitada devido, neste caso, tanto à presença de ruídos na pseudodistância quanto ao uso dos parâmetros contidos na mensagem de navegação, e a presença de erros que não são modelados (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Diferentemente do posicionamento por ponto simples, no PPP as observações são pós processadas utilizando-se efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites, as quais estão vinculadas a determinada época de referência (época de rastreamento) e normalmente à rede materializada do *International GNSS Service* (IGS), atualmente denominada IGS14 (IGS, 2017; BRAGA & DAL POZ, 2017; CARVALHO et al., 2014). Assim no PPP, as órbitas são as únicas informações externas que definem o Datum geodésico, de modo que as coordenadas estimadas das estações compartilharão o sistema de referência definido pelas órbitas dos satélites.

Além disso, ambas as pseudodistâncias e a fase da onda portadora são utilizadas como dados. A precisão do método pode ser ainda melhor com a utilização de receptores de dupla frequência, que corrige os efeitos de primeira ordem provindos da ionosfera, através da combinação linear das frequências L1 e L2, denominada livre dos efeitos da ionosfera (*ionosphere-free combination*). Para receptores de uma frequência o usuário do sistema GNSS pode utilizar o modelo de Klobuchar para minimizar o efeito da ionosfera (LEICK, 2004).

O modelo matemático do PPP para receptores de dupla frequência, utilizando a fase da onda portadora é dado pela Equação 3. Esse modelo emprega a combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (MONICO, 2008; LEICK, 2004).

$$\varphi_{r(IF)}^S = \frac{f^1}{c} * \rho_r^S + f^1(dt_r - dt^S) + N_{IF} + \frac{f^1}{c} * T_{r0}^S + \frac{f^1}{c} * dT_Z * m(\epsilon) \quad (3)$$

Sendo:

- $\varphi_{r(IF)}^S$ : fase obtida da combinação linear livre dos efeitos da ionosfera;
- $c$  : velocidade da luz no vácuo.
- $dt_r$ : erro do relógio do receptor em relação ao sistema de tempo GPS;
- $dt^S$ : erro do relógio do satélite em relação ao sistema de tempo GPS;
- $dT_Z$ : atraso zenital troposférico residual a ser estimado no modelo - ZWD;
- $f^1$ : frequência da observável livre dos efeitos da ionosfera (igual à da portadora L1);

- $m(\epsilon)$ : função de mapeamento em função do ângulo de elevação  $\epsilon$  do satélite;
- $N_{IF}$ : ambiguidade da observável livre dos efeitos da ionosfera;
- $T_{r0}^S$ : atraso troposférico aproximado a partir de algum modelo - ZHD.
- $\rho_r^S$ : distância geométrica entre o centro de fase da antena do satélite ( $S$ ), no instante de transmissão, e do receptor ( $r$ ), no instante de recepção do sinal;

É interessante notar que o erro da ionosfera não comparece no lado direito da expressão (3), pois com a aplicação da combinação livre dos efeitos da ionosfera seus efeitos de primeira ordem são eliminados.

Uma vantagem da utilização de PPP é a facilidade de processar os dados, visto que atualmente se encontram disponíveis vários serviços de PPP *online* gratuitos, que podem ser utilizados por qualquer usuário, empregando qualquer receptor no levantamento, dispondo apenas do arquivo RINEX (*Receiver Independent EXchange Format*) ou HATANAKA (GHODDOUSI-FARD & DARE, 2006). Além disso, constata-se um aumento do interesse no PPP em tempo real pela comunidade acadêmica (MARQUES, 2012).

Dentre os serviços *online* mais utilizados que permitem realizar o PPP *online* estão:

- CSRS-PPP- *Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning* (NRCAN, 2017);
- IBGE-PPP - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Posicionamento por Ponto Preciso (IBGE-PPP, 2017);
- GAPS-UNB - *GNSS Analysis and Positioning Software* da *University of New Brunswick*, Canadá (GAPS, 2017);
- APPS - *Automatic Precise Positioning Service* (APPS GIPSY 6.3) do *Jet Propulsion Laboratory* – JPL NASA (JPL, 2017);
- magicPPP- *magicGNSS* da *GMV Aerospace and Defense S.A* (GMV, 2017).

Vale salientar que o IBGE-PPP utiliza o mesmo serviço utilizado e desenvolvido pelo *Natural Resources Canada - NRCAN* (CSRS-PPP).

O software livre gLAB desenvolvido pelo *European Space Agency (ESA)*, também realiza o posicionamento GPS por ponto e PPP, mas não é um *web service*. Neste software, cada fonte de erro no posicionamento pode ser avaliada de forma independente, o que, por sua vez, proporciona um grande benefício para pesquisa (HERNANDEZ-PAJARES et al., 2010).

Além disso, vários outros softwares desenvolvidos nos últimos anos por agências governamentais e universidades implementam uma estratégia de processamento de PPP. A Tabela 1 apresenta brevemente os provedores de alguns desses pacotes. No entanto, muito destes softwares de processamento PPP não são fornecidos gratuitamente.

Tabela 1 - Alguns pacotes de softwares PPP disponíveis.

Software	Provedor
BERNESE GNSS V. 5.2	Instituto Astronômico da Universidade de Berna (AIUB), Suíça. Fonte: <a href="http://www.bernese.unibe.ch/index.html">http://www.bernese.unibe.ch/index.html</a>
GIPSY-OASIS II	JPL (Jet Propulsion Laboratory - Instituto de Tecnologia da Califórnia),EUA. Fonte: <a href="https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov">https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov</a>
GPSTk	Laboratórios de Pesquisa Aplicada da Universidade do Texas em Austin. Fonte: <a href="http://www.gpstk.org/bin/view/Documentation/WebHome">http://www.gpstk.org/bin/view/Documentation/WebHome</a>
RTKLIB	Ciência e Tecnologia Marinha da Universidade de Tóquio. Fonte: <a href="http://www.rtklib.com/">http://www.rtklib.com/</a>

Independentemente do programa utilizado no PPP, a maior parte das fontes de erros devem ser consideradas no processamento dos dados GNSS.

Em aplicações de alta precisão os efeitos de multicaminho devem ser evitados ou minimizados pelo uso de antenas especiais (por exemplo, *choke ring*). Os efeitos de órbita e dos relógios dos satélites são minimizados pelo uso das efemérides precisas fornecias pelo IGS. Outros efeitos também devem ser considerados, tais como, efeitos de rotação da Terra, variações do centro de fase de antenas GNSS, relatividade, *phase wind up*, perdas de ciclos, etc. Efeitos

geodinâmicos, tais como efeitos de deslocamento de placas tectônicas, cargas dos oceanos, carga da pressão atmosférica e marés terrestres também são usualmente modelados. Apesar desses efeitos não afetarem os sinais GNSS, se eles não forem considerados no PPP, as coordenadas das estações oscilariam devido aos deslocamentos verticais e horizontais produzidos por esses efeitos.

Ao contrário do que ocorre com o uso de receptores de uma frequência, com uso de receptores de duas frequências o efeito da ionosfera deixa de ser a maior fonte de erro, uma vez que os efeitos de primeira ordem da ionosfera são eliminados, em função da utilização da combinação linear livre dos efeitos da ionosfera. Desta forma, neste caso, um dos fatores mais limitantes da acurácia do PPP consiste na modelagem adequada do efeito da troposfera, bem como na estimativa de seu efeito residual.

## 4.2. Troposfera

Para estudos relacionados com a propagação de ondas eletromagnéticas, a divisão da estrutura da atmosfera é organizada em duas camadas: a ionosfera e troposfera, ou seja, uma camada com a presença de partículas ionizadas, e a outra eletricamente neutra, respectivamente. Desta forma, a refração troposférica refere-se ao atraso na trajetória do sinal eletromagnético causada pela parte não ionizada (neutra) da atmosfera terrestre, como ilustrado na Figura 2 (SANZ SUBIRANA et al., 2013).

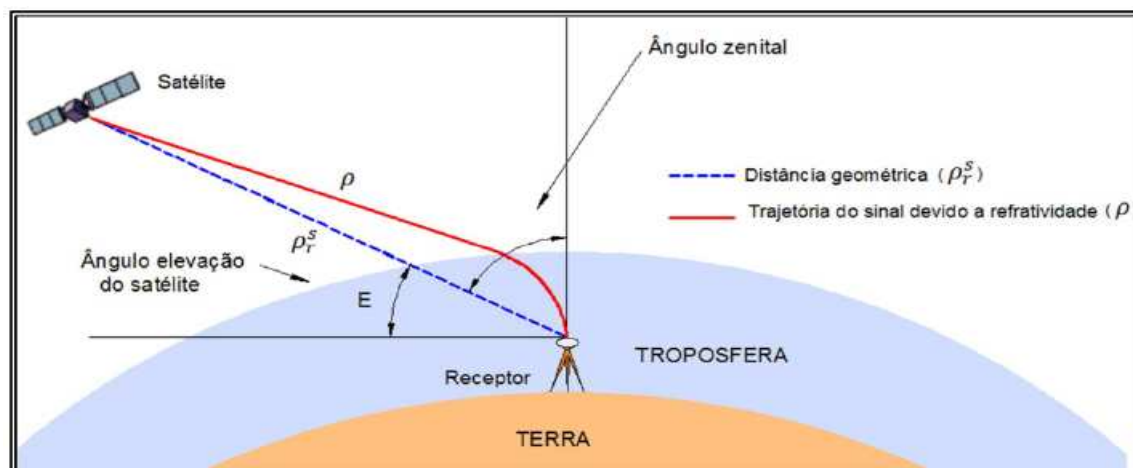


Figura 2 - Atraso da trajetória do sinal devido aos efeitos da refração troposférica.

Fonte: (Adaptado de SAPUCCI (2001b) e MONICO (2016)).

A troposfera estende-se da superfície terrestre até uma altitude da ordem de 50km, além disso, é um meio não dispersivo para ondas de rádio com frequências inferiores a 30 GHz (FUND, 2009; SEEBER, 2003). Em vista disso, a refração troposférica é idêntica para as três portadoras GNSS (L1, L2 e L5), bem como para as medições de códigos moduladas nas portadoras. Como este atraso não depende da frequência então a refração troposférica não pode ser removida pela combinação entre as portadoras, como na ionosfera. Desta forma, uma maneira de mitigar o efeito troposférico é usar modelos (LEICK, 2004).

Dentre os efeitos causados na propagação do sinal devido a troposfera podem-se citar: atenuação atmosférica, cintilação troposférica, e o atraso troposférico (SPILKER, 1996; SAPUCCI et al., 2004; MONICO, 2008). A atenuação atmosférica refere-se à diminuição da potência do sinal eletromagnético de acordo com a frequência da onda, devido aos elementos constituintes da atmosfera. Em relação ao GNSS, recomenda-se utilizar ângulos de elevação maiores que 5° (denominada máscara de elevação nos softwares de processamento GNSS) (MONICO, 2008).

Já a cintilação troposférica está relacionada a oscilação na amplitude da onda eletromagnética, devido às irregularidades e turbulência no índice de refração atmosférica. A cintilação troposférica é significativa para pequenos ângulos de elevação (~5°) e curtos intervalos de rastreamento (OLIVEIRA JÚNIOR, 2015).

No entanto, o atraso troposférico corresponde à maior perturbação provocado nos sinais GNSS devido a troposfera, ocasionado pela influência da atmosfera hidrostática (composta por gases secos) e a úmida (vapor de água e a água condensada na forma de nuvens). A componente hidrostática tem um efeito maior, aproximadamente 2,3 metros no zênite, e está relacionada, sobretudo, à quantidade de oxigênio e nitrogênio. Contudo, apesar da componente úmida ter um efeito menor, variando de 1 a 35 cm no zênite, a sua variabilidade é mais elevada, atingindo cerca de 20% em poucas horas, o que dificulta a sua modelagem (SEEBER, 2003; SAPUCCI et al., 2004; MONICO, 2008).

No processamento de dados GNSS, o atraso troposférico depende da distância percorrida pela onda de rádio através da atmosfera neutra e, portanto, também é uma função do ângulo de elevação do satélite, e depende de fatores como temperatura atmosférica, pressão e umidade relativa (SANZ SUBIRANA et al., 2013). Desse modo, o sinal transmitido por um satélite próximo ao horizonte tem efeito maior da refração troposférica se comparado com um satélite próximo ao zênite do receptor. Assim, o atraso troposférico pode ocasionar um erro em torno de 2,5m no zênite e até valores superiores a 25 metros próximo ao horizonte, como ilustrado na Figura 3.

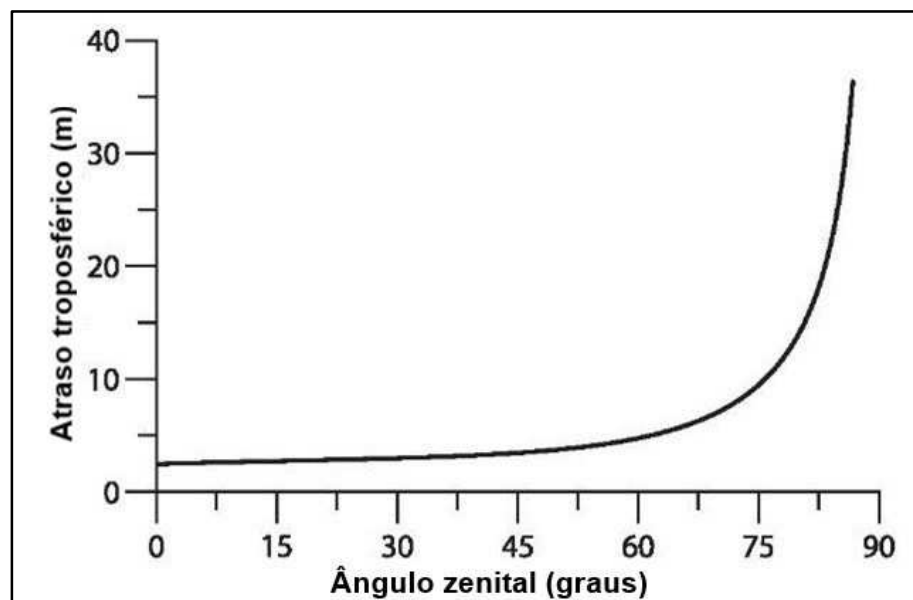


Figura 3 - Variação do atraso troposférico em função do ângulo zenital (°) de acordo com o modelo modificado de Hopfield.  
Fonte: (Adaptado de XU & XU, 2016).

De modo a evidenciar essa dependência de elevação, o atraso troposférico é obtido a partir do produto do atraso na direção zenital em relação a uma função de mapeamento, de acordo com Equação 4.

$$SPD(\epsilon) = f_{dry}(\epsilon)ZHD + f_{wet}(\epsilon)ZWD \quad (4)$$

Em que,

- SPD: Atraso troposférico inclinado (m) ao longo do ângulo de elevação ( $\epsilon$ );
- ZHD: Atraso hidrostático do zênite (m);  
ZWD = Atraso úmido do zênite (m);

- $f_{dry}$  e  $f_{wet}$ : São as funções de mapeamento hidrostática e úmida.

No BSW, o atraso hidrostático a priori na direção do zênite é calculado com bastante precisão a partir de um modelo de pressão superficial simplificado, e o atraso restante é estimado juntamente com outros parâmetros (DACH et al., 2015). Em resumo, o atraso troposférico total ZTD na linha de visada (satélite-receptor) é obtido a partir a soma do atraso hidrostático e úmido na direção zênital, multiplicada pelas respectivas funções de mapeamento, e uma correção de gradiente, de acordo com a Equação 5 (BAR-SEVER et al., 1998; IERS, 2010):

$$STD_r^S(t_r, \epsilon_r^S, Az_r^S) = f_{dry_{t_r}}(\epsilon_r^S) \cdot ZHD_{t_r} + f_{wet_{t_r}}(\epsilon_r^S) \cdot ZWD_{t_r} + [f_{m_g}(\epsilon_r^S) \cdot (G_{NS_{t_r}} \cdot \cos(Az_r^S) + G_{EW_{t_r}} \cdot \sen(Az_r^S))] \quad (5)$$

Em que:

- $STD_r^S(t_r, \epsilon_r^S, Az_r^S)$ : Atraso total troposférico inclinado entre a estação  $r$  e o satélite  $s$ , na época  $t_r$ , com ângulo de elevação  $\epsilon_r^S$  e azimuth  $Az_r^S$ ;
- $f_{dry_{t_r}}$  e  $f_{wet_{t_r}}$ : São as funções de mapeamento hidrostática e úmida, respectivamente para a época  $t_r$  e ângulo de elevação  $\epsilon_r^S$ ;
- $ZHD_{t_r}$  e  $ZWD_{t_r}$  são  $ZHD$  e  $ZWD$ , respectivamente para a época  $t_r$ ;
- $f_{m_g}$ : Função de mapeamento de gradiente total para o ângulo de elevação  $\epsilon_r^S$ ;
- $G_{NS_{t_r}}$ : Gradiente horizontal na direção Norte-Sul para época  $t_r$ ;
- $G_{EW_{t_r}}$ : Gradiente horizontal na direção Leste-Oeste para época  $t_r$ .

Desta forma, a componente hidrostática do atraso troposférico ( $ZHD$ ) é completamente absorvida por um modelo a priori, e a componente úmida ( $ZWD$ ) é predita juntamente com os outros parâmetros. Além disso, para aplicações de alta acurácia, e quando se utiliza medidas com baixos ângulos de elevação, é recomendável a estimativa de gradientes troposféricos horizontais (OLIVEIRA JÚNIOR, 2017; GHODDOUSI-FARD; 2009; CHEN & HERRING, 1997).

A Figura 4 apresenta a componente úmida do atraso troposférico estimada para cinco estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos

Sistemas GNSS), no dia 219 (dia do ano – DOY – *Day of Year*) do calendário corrido do ano de 2016 (06/08/2016). O processamento foi realizado no BSW v5.2, aplicando o PPP. O modelo troposférico a priori empregado para o cálculo da componente hidrostática foi GPT/GMF, já a componente úmida foi predita com os outros parâmetros no ajustamento de observações. Nota-se que cada estação GNSS está localizada em uma região geográfica do Brasil.

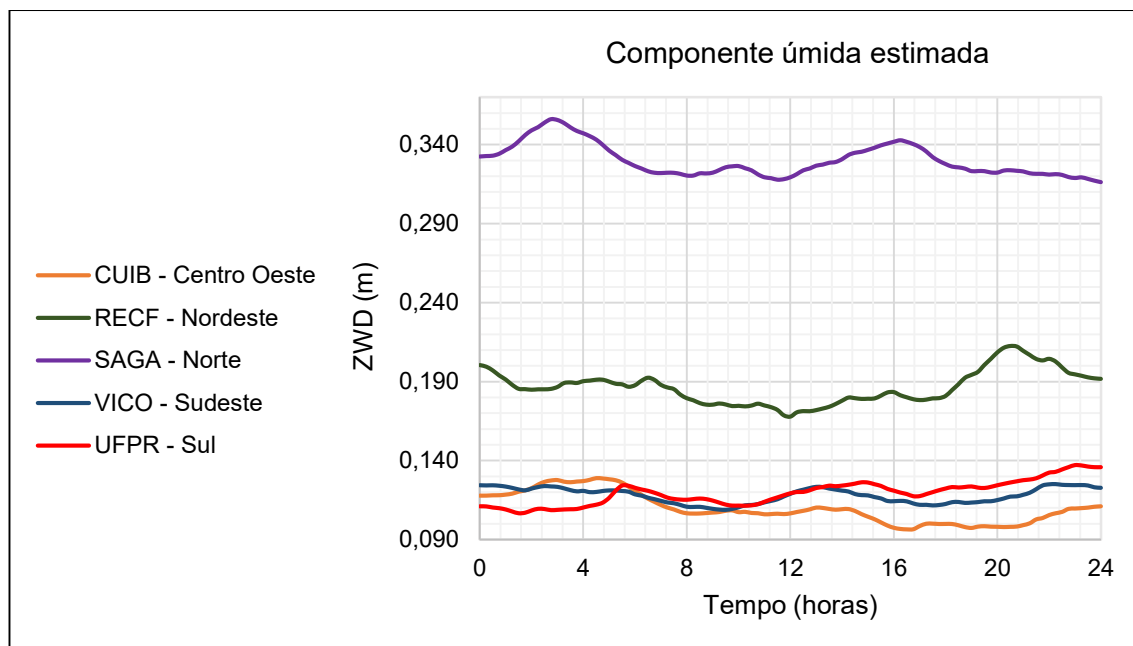


Figura 4 - Componente úmida estimada (ZWD) no software Bernese GNSS.

Analisando a Figura 4 é possível observar a variação da componente úmida ao longo do dia. Nota-se que a estação SAGA (São Gabriel Cachoeira) localizada na região Norte do país obteve o maior valor de ZWD, em torno de 34 cm, o que é coerente visto que a mesma está localizada na Amazônia, onde o regime de chuvas ocorre o ano inteiro, contendo assim, uma grande quantidade de vapor de d'água na atmosfera.

A Figura 5 ilustra a série diária de umidade referente a estação SAGA no mês de agosto de 2016, verifica-se que para dia 06 (DOY: 219), a umidade média é em torno de 80%, já a estação UFPR localizada no Sul do Brasil obteve valor médio de umidade de aproximadamente 60% (Figura 6).

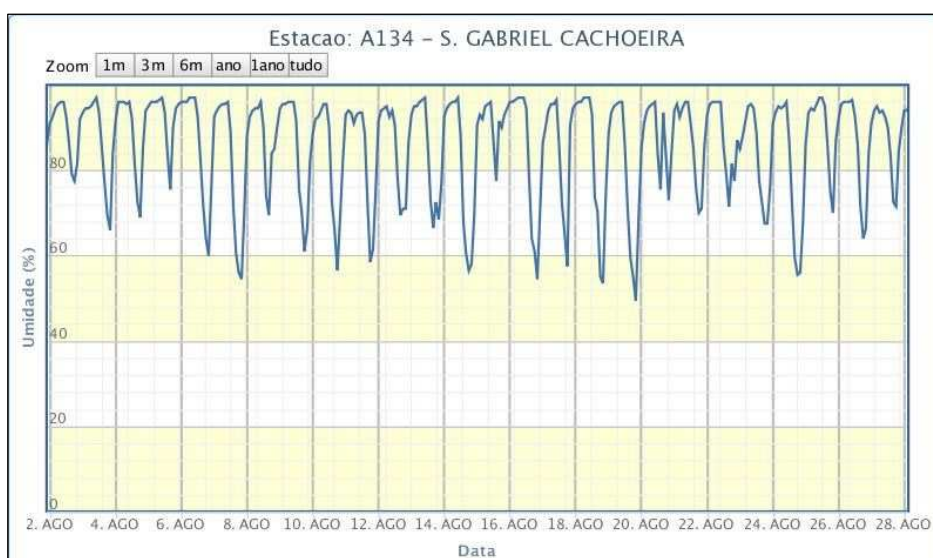


Figura 5 - Umidade (%) para a estação SAGA no mês de agosto de 2016.  
 Fonte: (INMET, 2016).

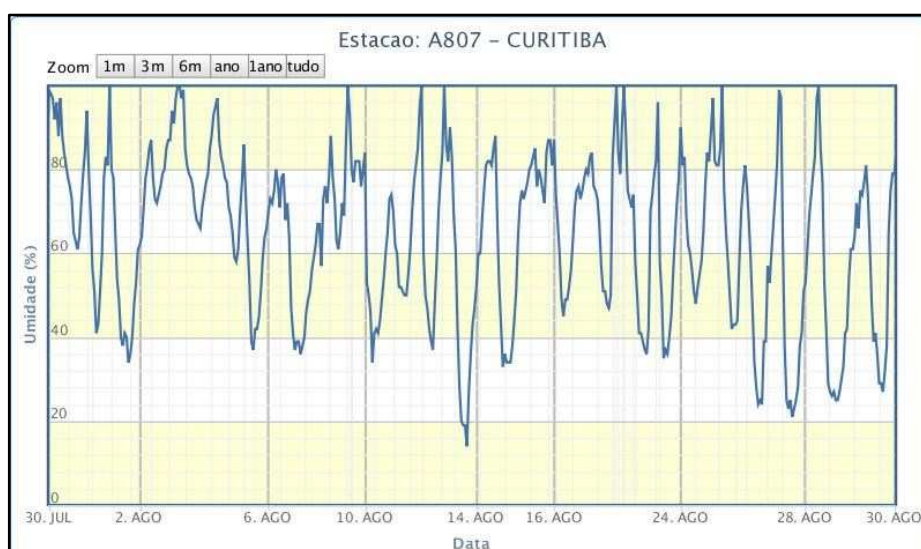


Figura 6 - Umidade (%) para a estação UFPR no mês de agosto de 2016.  
 Fonte: (INMET, 2016).

O atraso troposférico total no zênite para as 5 estações da RBMC é apresentado na Figura 7. Avaliando a Figura 7, nota-se que das estações GNSS analisadas os valores de atraso troposférico ficaram entre 2,18 m a 2,68 m. Assim, a estação SAGA apresentou o maior ZTD, seguida depois das estações RECF (Nordeste), CUIB (Centro-Oeste), VICO (Sudeste) e UFPR (Sul). Desse modo, é notório que estações GNSS experimentam diferentes influência da refração troposférica visto que, esse erro depende da composição atmosférica e fatores climáticos da região.

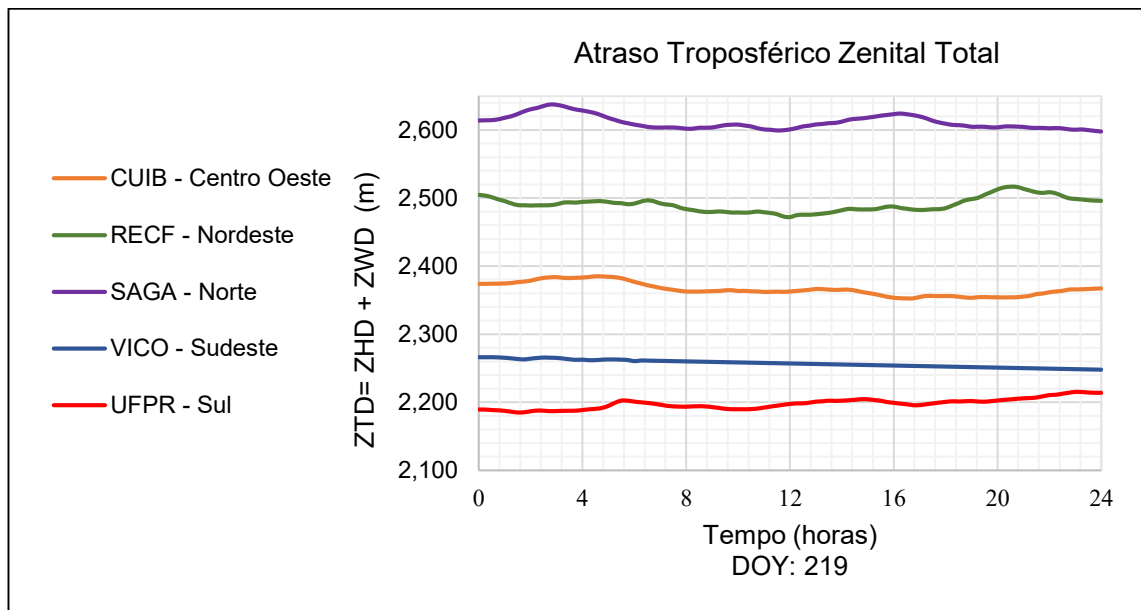


Figura 7 - Atraso troposférico total (ZTD), em metros.

#### 4.2.1. Modelagem da refração troposférica

A componente hidrostática do atraso troposférico pode ser obtida a partir de medidas meteorológicas locais de superfície, ou através de um modelo de Previsão Numérica de Tempo, ou com base no modelo de pressão e temperatura como o GPT (KOUBA, 2008).

Nessa seção são descritos os modelos de correção dos efeitos troposféricos Saastomoinen e Hopfield. Salienta-se que estes modelos são empíricos, obtidos com base em observações meteorológicas coletadas predominantemente no hemisfério norte e sobre regiões continentais (SILVA et al., 1999). Além disso, uma breve descrição sobre os modelos globais PNT/ECMWF e GPT também são realizadas. Destaca-se que existem outros modelos troposféricos que podem ser usados para estimar o atraso troposférico dos sinais da banda L, como por exemplo os modelos UNB3 (COLLINS & LANGLEY, 1997); UNB3m (LEANDRO et al., 2006); IGGtrop (LI et al., 2012); TropGrid2 (SCHÜLER, 2014); CMONOC (LOU et al., 2018), dentre outros.

Na sequência, são detalhadas as funções de mapeamentos Niell (NIELL, 1996), VMF (BÖHM et al., 2006b) e GMF (BÖHM et al., 2006a), e posteriormente a estimativa dos gradientes horizontais no PPP e suas funções de mapeamento.

#### 4.2.1.1. Modelo de Saastamoinen

Um dos modelos mais populares para calcular a refração troposférica é o modelo empírico de Saastamoinen (1972) baseado nas leis associadas a um gás ideal. O modelo adota a premissa de condições de equilíbrio hidrostático (SAASTAMOINEN, 1972, MONICO, 2008). A Equação 6 refere-se ao modelo proposto por Saastamoinen com alguns refinamentos (DACH et al., 2015).

$$ZTD_r^s = \frac{0,002277}{\cos z} \left[ P + \left( \frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B * \tan^2 z \right] + \delta R \quad (6)$$

Em que:

- $P$  : Pressão atmosférica dada em milibares
- $T$  : É a temperatura absoluta  $T$  em Kelvin ( $T=273,2+t$ , com  $t$  sendo a temperatura em graus celsius);
- $B$  e  $\delta R$  : Fatores de correção dependente da altura da estação e da elevação do satélite. Salienta-se que somente o termo  $B$  é implementado no BSW.
- $z$ : É o ângulo zenital, obtido de acordo com a expressão 7, em que  $\epsilon$  refere-se ao ângulo de elevação do satélite.

$$z=90^\circ - \epsilon \quad (7)$$

- $e$ : É a pressão parcial de vapor de água dada em milibares, obtida de acordo com a Equação 8:

$$e = R_h \exp(-37,2465+0,213166T-0,000256908T^2) \quad (8)$$

Em que  $R_h$  é a umidade relativa dada em %, e  $\exp ( )$  é a função exponencial. No modelo são utilizados valores medidos de pressão, temperatura e umidade, ou então os valores são derivados de um modelo atmosférico padrão. As Equações 9 a 11 demonstram como os valores de pressão, temperatura e umidade podem ser obtidos:

$$P = P_0 [1 - 0,0000266(h - h_0)]^{5,225} \quad (9)$$

$$T = T_0 - 0,0065(h - h_0) \quad (10)$$

$$R_h = R_{h_0} \exp^{-0,0006396(h-h_0)} \quad (11)$$

Onde  $P_0$ ,  $T_0$  e  $R_{h_0}$  são chamados de pressão, temperatura e umidade padrão na altura de referência  $h_0$ , dados por:

$$h_0 = 0m, \quad P_0 = 1013,25 \text{ mbar}, \quad T_0 = 18^\circ\text{C} \quad \text{e} \quad R_{h_0} = 50\%$$

#### 4.2.1.2. Modelo de Hopfield

No modelo de atraso troposférico desenvolvido por Hopfield (1969) as componentes de refratividade hidrostática e úmida estão em função dos valores de temperatura, pressão, e da altura da camada atmosférica ( $H$ ) que interfere na propagação dos sinais eletromagnéticos, em relação a estação de rastreamento (SAPUCCI & MONICO, 2001a; SEEBER, 2003). As Equações 12 e 13 referem se ao cálculo do atraso troposférico das componentes úmida (ZWD) e hidrostática (ZHD) de acordo com o modelo modificado de Hopfield.

$$ZHD = 155,2 * 10^{-7} \frac{P_0}{T_0} H_{dry} \quad (12)$$

$$ZWD = 155,2 * 10^{-7} \frac{4810e_0}{T_0^2} H_{wet} \quad (13)$$

Em que:

- $P_0$  : É a pressão atmosférica total medida na superfície (em *hPa*);
- $e_0$ : É a pressão parcial de vapor d'água (em *hPa*);
- $T_0$ : É a temperatura medida na superfície (em *Kelvins*);
- $H_{dry}$ : É a altura em metros da camada atmosférica da componente hidrostática, dada por:

$$H_{dry} = 40136 + 148,72(T_0 - 273,16) \quad (14)$$

- $H_{wet}$ : É a altura em metros da camada atmosférica da componente úmida. O valor de  $H_{wet}$  é constante, obtido de acordo com a Equação 15. No entanto, este valor refere-se a locais próximos ao Equador (SAPUCCI & MONICO, 2001a).

$$H_{wet} = 11000m \quad (15)$$

O atraso troposférico total de acordo com o modelo Hopfield (Equação 16) é obtido a partir da soma do atraso hidrostático e úmido na direção zênital, multiplicada pelas funções de mapeamento correspondentes (Equações 17 e 18).

$$ZTD = fm_{dry} * ZHD + fm_{wet} * ZWD \quad (16)$$

$$fm_{dry} = (\text{sen}(\epsilon^2 + 6,25)^{\frac{1}{2}})^{-1} \quad (17)$$

$$fm_{wet} = (\text{sen}(\epsilon^2 + 2,25)^{\frac{1}{2}})^{-1} \quad (18)$$

Em que as  $fm_{dry}$  e  $fm_{wet}$  são as funções de mapeamento hidrostáticas e úmidas, respectivamente para o modelo modificado de Hopfield (MONICO, 2008).

#### 4.2.1.3. Modelo Global de Previsão Numérica de Tempo do ECMWF

De acordo com Sapucci et al. (2003), os modelos de PNT possuem uma modelagem dinâmica, em que se conhecendo as leis de evolução do estado da atmosfera, pode-se determinar seu estado futuro, desde que que seja conhecido com precisão seu estado inicial.

Neste sentido, o atraso ao longo do caminho de propagação do sinal GNSS depende da refratividade ao longo do percurso, e este último pode ser determinado a partir de valores de pressão, temperatura e umidade, disponíveis nos modelos PNT. Portanto, o PNT pode ser usado para determinar a refratividade ao longo do caminho e, conseqüentemente, os atrasos troposféricos dos sinais GNSS (BÖHM et al., 2011).

Alguns modelos globais numéricos de previsão de tempo de médio prazo são desenvolvidos por centros de pesquisas no mundo, tais como, o Sistema de Previsão Global GFS (*Global Forecast System*) produzido pelo NCEP (*National Center for Environmental Prediction*), e o atual modelo troposférico global determinístico do ECMWF.

O PNT/ECMWF requer a entrada contínua de dados meteorológicos de superfície, obtidos por satélites, observações em Terra, estações automáticas, aviões, bóias, navios, dados de sensoriamento remoto e radiossondas, de modo a fornecer previsões atuais, e reanálises climáticas. O modelo possui resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  com 21 níveis na vertical. Desta forma, o atraso troposférico para uma dada posição é obtido realizando uma interpolação bilinear para a posição da estação utilizando os valores do grid (OLIVEIRA et al., 2014). Os valores ZTD provenientes do modelo ECMWF são disponibilizados juntos com os coeficientes da função de mapeamento de Viena.

Independente do modelo utilizado para correção dos efeitos do atraso troposférico, informações de entrada referentes a temperatura e pressão são de fundamental importância. Neste sentido, foram desenvolvidos alguns modelos globais de pressão e temperatura.

#### **4.2.1.3.1. Modelo Global de Pressão e Temperatura**

O modelo empírico GPT desenvolvido por BÖHM et al. (2007), fornece valores de pressão e temperatura nas proximidades da superfície terrestre, que são utilizados para calcular as estimativas a priori da componente hidrostática do atraso troposférico. Este modelo é um ajuste em harmônicos esféricos até grau e ordem 9, e têm como parâmetros de entrada as coordenadas geodésicas da estação e o dia do ano.

O GPT foi construído com base nos dados de 3 anos dos *grids* globais (setembro 1999 a agosto de 2002) de  $15^\circ \times 15^\circ$  dos perfis médios mensais para pressão e temperatura dos dados de reanálise de 40 anos do ECMWF. Os valores de pressão e temperatura são determinados para a superfície da Terra, em cada perfil vertical, realizando uma interpolação exponencial e linear,

respectivamente. Na sequência, estes valores de pressão  $P$  na superfície a uma altura  $h$  são reduzidos aos valores de pressão  $P_0$  no nível médio do mar (vide Equação 9). Além disso, um fator de diminuição linear da temperatura  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) em relação à altura (metros) é adotado (Equação 19) (BÖHM et al., 2007).

$$\frac{dT}{dh} = -0,0065 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{metros}} \quad (19)$$

Para cada ponto do *grid*, estão disponíveis 36 valores mensais da pressão e da temperatura ao nível médio do mar. Em relação a estas duas séries, os valores médios,  $a_0$  e as amplitudes anuais,  $A$ , são estimados com o deslocamento de fase fixado em 28 de janeiro, onde o DOY é o dia do ano, de acordo com a Equação 20 (BÖHM et al., 2007):

$$a = a_0 + A \cdot \cos\left(\frac{\text{DOY} - 28}{365} 2\pi\right) \quad (20)$$

No próximo passo, valores médios e amplitudes anuais de pressão e temperatura são expandidas para harmônicos esféricos até grau e ordem nove (Equação 21).

$$a_0 = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin \varphi) \cdot [A_{nm} \cdot \cos(m \cdot \lambda) + B_{nm} \cdot \sin(m \cdot \lambda)] \quad (21)$$

Em que:

- $a_0$  : é o *grid* global de valores médios;
- $A$ : são as amplitudes anuais;
- $P_{nm}(\sin \varphi)$ : são as funções associadas a Legendre de grau  $n$  e ordem  $m$ ;
- $A_{nm}$  e  $B_{nm}$  são os coeficientes de harmônicos esféricos determinados no ajustamento dos mínimos quadrados; e
- DOY: É o dia corrido do ano, um número entre 1 e 365 (1 de janeiro é o dia 1).

O GPT usa a Equação 21 para derivar o valor médio,  $a_0$ , e uma equação similar para amplitude,  $A$ , que são então inseridas na Equação 20 juntamente com o DOY para obter a pressão ou a temperatura no nível médio do mar.

O modelo GPT apresenta bom desempenho para estações de baixa e média latitude. No entanto, devido às variações reais não representados pelos valores sazonais da pressão neste modelo, os erros na componente altimétrica podem as vezes exceder 1cm, particularmente em regiões polares ou com ângulos de corte de elevação inferiores a 10 graus (KOUBA, 2008).

Böhm et al. (2014) desenvolveram um modelo empírico aprimorado para atraso troposférico designado GPT2w (*Global pressure and temperature 2 wet*) baseados em valores de grids de pressão de vapor de água, fator de diminuição do vapor de água e temperatura média ponderada. O GPT2w também utiliza os coeficientes hidrostáticos e úmidos do VMF1. Já o mais novo modelo empírico global de pressão e temperatura é o GPT3 (*Global Pressure and Temperature 3*), desenvolvido por Landskron & Böhm (2017). Seus principais componentes são os coeficientes empíricos hidrostáticos e úmidos da nova função de mapeamento VMF3 (*Vienna Mapping Functions 3*). Destaca-se que os modelos GPT2w e GPT3 não estão implementados no BSW.

#### 4.2.2. Funções de Mapeamento

A função de mapeamento troposférico se refere à transformação do atraso troposférico no zênite para direções inclinadas desejadas, e normalmente é realizada separadamente para os componentes hidrostática e úmida (KOUBA, 2008). Estas funções são baseadas em frações contínuas (MARINI, 1972), e normalizadas para fornecer a unidade no zênite (HERRING, 1992), como mostra a expressão 22.

$$f_m = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin \epsilon + \frac{a}{\sin \epsilon + \frac{b}{\sin \epsilon + c}}} \quad (22)$$

Onde,

- $f_m$  é a função de mapeamento;
- $\epsilon$  é o ângulo de elevação;

- a, b e c são coeficientes empíricos com valores diferentes em várias funções de mapeamento, sendo que  $(a_{dry}, b_{dry}, c_{dry})$  e  $(a_{wet}, b_{wet}, c_{wet})$  são utilizados para as componentes hidrostáticas e úmidas, respectivamente.

Vale ressaltar, no entanto, que para uma primeira ordem todas as funções de mapeamento podem ser aproximadas pela Equação 23 (DATH et al., 2015):

$$f_{dry}(z) \cong f_{wet}(z) \cong f(z) \cong \frac{1}{\cos z} \quad (23)$$

Dentre as funções de mapeamentos implementadas no BSW têm se:  $\frac{1}{\cos Z'}$ , Hopfield, NMF (NIELL, 1996), VMF1 (BÖHM et al., 2006b), GMF (BÖHM et al., 2006a). Em seguida, é apresentado um resumo das funções de mapeamento NMF, VMF1 e GMF.

#### 4.2.2.1. Niell Mapping Function (NMF)

A Função de Mapeamento *Niell Mapping Function* (NMF), foi introduzida em 1996 por Niell (1996), e se baseia nas mudanças temporais e de localização geográfica, em vez de parâmetros meteorológicos de superfície (SAKIDIN et al., 2009). As Equações 24 e 25 demonstram como são obtidos  $NMF_{dry}$  e  $NMF_{wet}$ .

- Para a componente hidrostática.

$$NMF_{dry}(\epsilon) = \frac{1 + \frac{a_{dry}}{1 + \frac{b_{dry}}{1 + c_{dry}}}}{\sin \epsilon + \frac{a_{dry}}{\sin \epsilon + \frac{b_{dry}}{\sin \epsilon + c_{dry}}}} \quad (24)$$

$$+ H \cdot 10^{-3} \left[ \frac{1}{\sin \epsilon} - \left( \frac{1 + \frac{a_{Ht}}{1 + \frac{b_{Ht}}{1 + c_{Ht}}}}{\sin \epsilon + \frac{a_{Ht}}{\sin \epsilon + \frac{b_{Ht}}{\sin \epsilon + c_{Ht}}}} \right) \right]$$

- Para a componente úmida.

$$NMF_{wet}(\epsilon) = \frac{1 + \frac{a_{wet}}{1 + \frac{b_{wet}}{1 + c_{wet}}}}{\sin \epsilon + \frac{a_{wet}}{\sin \epsilon + \frac{b_{wet}}{\sin \epsilon + c_{wet}}}} \quad (25)$$

Em que:

- $NMF_{dry}(\epsilon)$ : Função de mapeamento hidrostática;
- $NMF_{wet}(\epsilon)$ : Função de mapeamento úmida;
- H: Altitude ortométrica da estação em metros;
- $a_{Ht}$ ,  $b_{Ht}$  e  $c_{Ht}$ : São os coeficientes de correções da altura ( $a_{Ht} = 2,53 * 10^{-3}$ ,  $b_{Ht} = 5,49 * e^{-3}$ ,  $c_{Ht} = 1,14 * e^{-3}$ ), determinados através do ajuste dos mínimos quadrados da correção de altura em nove ângulos de elevação (SAKIDIN et al., 2009; GHODDOUSI-FARD, 2009).

Desta forma, para a componente hidrostática da NMF, um termo de correção de altura é introduzido, e não são necessários dados meteorológicos (Equação 24). Os coeficientes ( $a_{dry}$ ,  $b_{dry}$  e  $c_{dry}$ ) da componente hidrostática são dados em função do dia do ano (DOY), latitude da estação, e no tempo  $t$  a partir de janeiro 0,0 (em dias do Tempo Universal) (Equações 26 a 28). Estes termos foram derivados de perfis de atmosfera padrão dos EUA para o hemisfério norte, armazenados nos meses de janeiro e julho, para a elevação de 3° (KARABATIC, 2011).

$$a(\varphi, t) = a_{avg}(\varphi) + a_{amp}(\varphi) \cos\left(\frac{t - DOY}{365,25} 2\pi\right) \quad (26)$$

$$b(\varphi, t) = b_{avg}(\varphi) + b_{amp}(\varphi) \cos\left(\frac{t - DOY}{365,25} 2\pi\right) \quad (27)$$

$$c(\varphi, t) = c_{avg}(\varphi) + c_{amp}(\varphi) \cos\left(\frac{t - DOY}{365,25} 2\pi\right) \quad (28)$$

Em que:

- DOY: Dia do ano adotado para fase, sendo 28 para o hemisfério Norte e 211 para o hemisfério Sul;

- $a_{avg}$  e  $a_{amp}$ : são obtidos pela interpolação linear entre as latitudes mais próximas (não tabuladas). A Tabela 2 apresenta estes coeficientes para cinco valores de latitudes.

Tabela 2 - Coeficientes para NMF.

Coefi.	Latitude				
	15°	30°	45°	60°	75°
$a_{h_{avg}}$	1,2769934.e <sup>-3</sup>	1,2769934.e <sup>-4</sup>	1,2465397. e <sup>-3</sup>	1,2196049. e <sup>-3</sup>	1,2045996. e <sup>-3</sup>
$b_{h_{avg}}$	2,9153695.e <sup>-3</sup>	2,9152299.e <sup>-3</sup>	2,9288445. e <sup>-3</sup>	2,9022565. e <sup>-3</sup>	2,9024912. e <sup>-3</sup>
$c_{h_{avg}}$	62,610505.e <sup>-3</sup>	62,837393.e <sup>-3</sup>	63,721774. e <sup>-3</sup>	63,824265. e <sup>-3</sup>	64,258455. e <sup>-3</sup>
$a_{h_{amp}}$	0	1,270962.e <sup>-5</sup>	2,6523662. e <sup>-5</sup>	3,4000452. e <sup>-5</sup>	4,1202191. e <sup>-5</sup>
$b_{h_{amp}}$	0	2,1414979.e <sup>-5</sup>	3,0160779. e <sup>-5</sup>	7,2562722. e <sup>-5</sup>	11,723375. e <sup>-5</sup>
$c_{h_{amp}}$	0	9,0128400.e <sup>-5</sup>	4,3497037. e <sup>-5</sup>	84,795348. e <sup>-5</sup>	170,37206. e <sup>-5</sup>
$a_{wet}$	5,8021897.e <sup>-4</sup>	5,6794847.e <sup>-4</sup>	5,8118019. e <sup>-4</sup>	5,9727542. e <sup>-4</sup>	6,1641693. e <sup>-4</sup>
$b_{wet}$	1,4275268.e <sup>-3</sup>	1,5138625.e <sup>-3</sup>	1,4572752. e <sup>-3</sup>	1,5007428. e <sup>-3</sup>	1,7599082. e <sup>-3</sup>
$c_{wet}$	4,3472961.e <sup>-2</sup>	4,6729510.e <sup>-2</sup>	4,3908931. e <sup>-2</sup>	4,4626982. e <sup>-2</sup>	5,4736038. e <sup>-2</sup>

Fonte: GHODDOUSI-FARD (2009).

Os coeficientes  $a_{wet}$ ,  $b_{wet}$  e  $c_{wet}$  depende apenas da latitude da estação, e também são interpolados linearmente entre as latitudes mais próximas (Tabela 2). Salienta-se que NMF é amplamente utilizada, devido à sua independência das observações meteorológicas de superfície (GHODDOUSI-FARD, 2009; XU & XU, 2016).

#### 4.2.2.2. Vienna Mapping Function (VMF)

*Vienna mapping functions* (VMF) foi desenvolvida no ECMWF por Böhm & Schuh (2004), e é baseada no modelo PNT/ECMWF. Os coeficientes da VMF possibilitam determinar o atraso troposférico para uma elevação inicial  $\epsilon$  de 3,3 graus. Os coeficientes  $b$  e  $c$  utilizados na Equação 29 são determinados empiricamente a partir da IMF (*Isobaric Mapping Functions*) para a parte hidrostática, com base em dados de radiossondas. Já os coeficientes  $b$  e  $c$  para componente úmida utiliza a NMF a 45° de latitude ( $b_{wet}: 0,00146$  e  $c_{wet}: 0,04391$ ) (GHODDOUSI-FARD, 2009; XU & XU, 2016).

Assim, com base na técnica *ray-tracing*<sup>1</sup> em um ângulo de elevação inicial de 3,3°, e em função da latitude e dia do ano usando o PNT, o coeficiente  $a$  pode ser determinado ao inverter a fração contínua, de acordo com a Equação 29.

$$a = \frac{A_0 + A_1 + A_2 + A_3}{B_0 + B_1 + B_2} \quad (29)$$

Em que,

- $A_0 = b + c \cdot b + b^2$ ;
- $A_1 = -fm \cdot b \cdot \sin(\epsilon) + c \cdot b \cdot \sin(\epsilon) + fm \cdot b^2 \cdot \sin(\epsilon) + c^2 \cdot \sin(\epsilon) - fm \cdot b \cdot c \cdot \sin(\epsilon) + c \cdot \sin(\epsilon)$ ;
- $A_2 = -fm \cdot c^2 \cdot \sin^2(\epsilon) + fm \cdot c \cdot \sin^2(\epsilon) + b \cdot \sin^2(\epsilon) + c \cdot \sin^2(\epsilon) + \sin^2(\epsilon) - fm \cdot b \cdot c \cdot \sin^2(\epsilon)$ ;
- $A_3 = -fm \cdot b \cdot \sin^3(\epsilon) - fm \cdot c \cdot \sin^3(\epsilon) - fm \cdot \sin^3(\epsilon)$ ;
- $B_0 = -c \cdot b - b + fm \cdot c + fm \cdot c^2 + fm \cdot b \cdot c$ ;
- $B_1 = -c \cdot \sin(\epsilon) + fm \cdot \sin(\epsilon) - c^2 \cdot \sin(\epsilon) + fm \cdot c \cdot \sin(\epsilon) + fm \cdot b \cdot \sin(\epsilon)$ ;
- $B_2 = -c \cdot \sin^2(\epsilon) - \sin^2(\epsilon)$ .

$fm$  é o valor da função de mapeamento resultante da técnica *ray-tracing*.

---

<sup>1</sup> *Ray-tracing* é um método para descrever a propagação de uma onda ou partícula através de um dado meio. A propagação do raio é regida pelas leis da óptica geométrica e, portanto, obedece ao princípio de Fermat de menor tempo de viagem. Uma descrição sobre a técnica *ray-tracing* pode ser encontrada em Boehm e Schuh (2003).

A VMF foi atualizada por Böhm et al. (2006b), e recebeu o nome de VMF1. Nesta atualização, os coeficientes  $b_h$  e  $c_h$  são derivados do ajuste dos mínimos quadrados a partir de dados do ECMWF de um ano, onde  $b_h$  é uma constante e  $c_h$  depende do DOY e da latitude. Estes coeficientes hidrostáticos são dados por (Equação 30 e 31):

$$b_h = 0,0029 \quad (30)$$

$$c = c_0 + \left[ \left( \cos \left( \frac{DOY - 28}{365} 2\pi + \psi \right) + 1 \right) \frac{c_{11}}{2} + c_{10} \right] (1 - \cos\varphi) \quad (31)$$

Em que:

- $\varphi$ : é a latitude;
- $\psi$ : Específica o hemisfério Norte ou Sul,
- $c_0$ ,  $c_{10}$ ,  $c_{11}$  e  $\psi$  hidrostáticos do VMF1 são apresentados nas Tabelas 3, respectivamente.

Tabela 3 - Parâmetros hidrostáticos da VMF1

Hemisfério	$c_0$	$c_{10}$	$c_{11}$	$\psi$
Norte	0,062	0,001	0,005	0
Sul	0,062	0,002	0,007	$\pi$

Fonte: GHODDOUSI-FARD (2009).

O VMF1 está disponível em um *grid* de 2,5° de longitude por 2,0° de latitude com uma resolução temporal de 6 horas, disponível do site do VMF1 (VMF1, 2017). Estes arquivos tem a seguinte estrutura ao serem baixados: VMFG\_yyyymmdd.Hhh, em que yyyy se refere ao ano; mm ao mês; dd ao dia do mês, e hh a hora do dia, variando entre os valores de 00, 06, 12 ou 18.

Salienta-se que  $b_{wet}$  e  $c_{wet}$  referentes aos coeficientes não-hidrostáticos do VMF1 são os mesmos para coeficientes não-hidrostáticos VMF (retirados da NMF a uma latitude de 45°). A Figura 8 exibe um trecho de um arquivo de grid dos coeficientes da função VMF1 para o dia 28 de janeiro de 2016. Neste arquivo cada linha da grade contém a latitude e a longitude em graus,  $a_h$ ,  $a_w$ , ZHD e ZWD. Os coeficientes hidrostáticos  $a_h$  referem-se à altura zero.

```

! Version:          1.0
! Source:           J. Boehm, TU Vienna (created: 2016-01-29)
! Data_types:       VMF1 (lat lon ah aw zhd zwd)
! Epoch:            2016 01 28 00 00 0.0
! Scale_factor:     1.e+00
! Range/resolution: -90 90 0 360 2 2.5
! Comment:          http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/
90.0  0.0 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0  2.5 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0  5.0 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0  7.5 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0 10.0 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0 12.5 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0 15.0 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0 17.5 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0 20.0 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0 22.5 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317
90.0 25.0 0.00117283 0.00058916 2.2941 0.0317

```

Figura 8 - Exemplo de um grid de coeficientes VMF1.

#### 4.2.2.3. Global Mapping Functions (GMF)

A GMF foi desenvolvida por Böhm et al. (2006a), e semelhante ao GPT utiliza *grids* de  $15^\circ \times 15^\circ$  de perfis médios mensais de pressão, temperatura e umidade dos dados de reanálise do ECMWF (ERA40). Os coeficientes *b* e *c* são obtidos a partir de equações empíricas da função VMF1, já os coeficientes hidrostáticos e úmidos *a* são obtidos de uma expansão em harmônicos esféricos (Vide Equações 20 e 21) (GHODDOUSI-FARD, 2009).

De acordo com Böhm et al. (2006a), a GMF fornece uma melhor precisão do que a NMF, e menores distorções de altura em relação a VMF1. Além disso, esta função de mapeamento é de fácil implementação, dispondo apenas como parâmetros de entrada as coordenadas geodésicas da estação, e o dia corrido do calendário GPS (DOY).

#### 4.2.3. Gradientes horizontais troposféricos

Devido alta heterogeneidade das condições atmosféricas, o atraso troposférico estimado em uma determinada época pode apresentar valores distintos ao ser projetado em direções inclinadas diferentes, mesmo que estas direções possuam o mesmo ângulo de elevação (OLIVEIRA JÚNIOR, 2017). Isto

está relacionado a suposição de homogeneidade azimutal nas funções de mapeamento. Portanto, o emprego de gradientes horizontais que represente uma componente simples dependente do azimute pode favorecer a modelagem dos efeitos troposféricos no processamento de dados GNSS (BAR-SEVER et al., 1998).

Desta forma, os gradientes norte e leste ( $G_{NS}$  e  $G_{EW}$ ) que descrevem a dependência do azimute da atmosfera neutra na componente norte-sul e leste-oeste, respectivamente, são mapeados com uma função de mapeamento de gradiente  $fm_g(\epsilon)$ , para o ângulo de elevação da observação (vide Equação 5).

Nas análises GNSS, os gradientes  $G_{NS}$  e  $G_{EW}$ , são estimados em conjunto com as coordenadas da estação e o atraso zenital úmido. Geralmente, é empregado o modelo de mapeamento simples fornecido por MacMillan (1995), de acordo com a Equação 32.

$$fm_g(\epsilon) = m_h(\epsilon) \cot(\epsilon) \quad (32)$$

Em que  $m_h(\epsilon)$  é uma função de mapeamento hidrostático. Há outra possibilidade para função de mapeamento dos gradientes troposféricos, tal como, Chen & Herring, obtida de acordo com a Equação 33 (CHEN & HERRING, 1997).

$$fm_g(\epsilon) = \frac{1}{(\sin(\epsilon) \tan(\epsilon) + c)} \quad (33)$$

Onde,  $c$  é uma constante equivalente a 0,0032. Os valores para  $c$  podem ser obtidos de acordo com o valor da refratividade atmosférica e da altura da estação. Além disso, os autores evidenciam que o valor de  $c$  interfere na função de mapeamento apenas para ângulos de elevação muito baixos (OLIVEIRA JÚNIOR, 2015).

Ademais, outra possibilidade para representar um gradiente troposférico é inclinar (*tilting*) a direção do zênite na função de mapeamento (Figura 9). Desta forma, a direção zenital troposférica, isto é, a direção com atraso troposférico mínimo resulta num ângulo troposférico zenital  $\tilde{z}$  que, em geral, é diferente da distância geométrica  $z$ . Ressalta-se que este modelo de gradiente pode ser

usado em conjunto com uma função de mapeamento arbitrária, desde que sua derivada em relação ao ângulo do zênite seja conhecida (MEINDL et al., 2004).

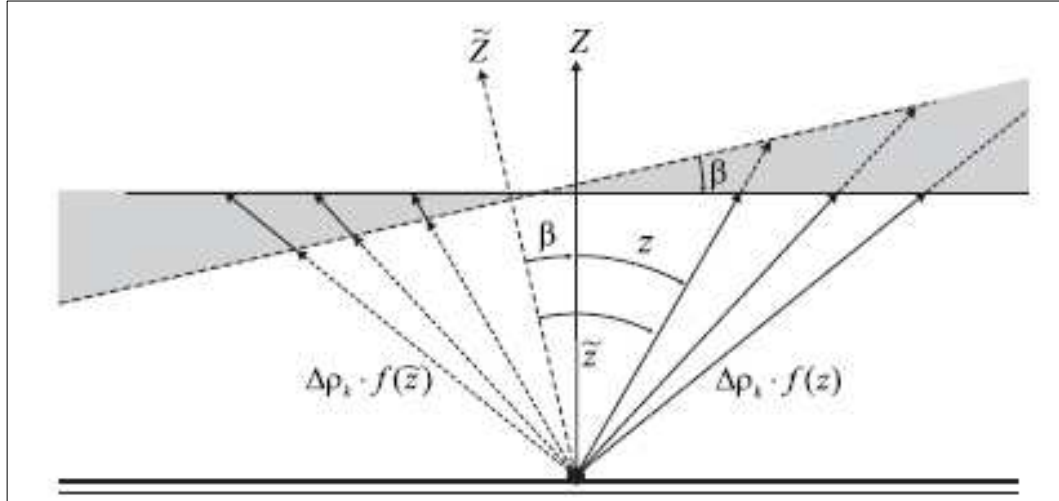


Figura 9 - Inclinando o zênite troposférico no ângulo  $\beta$ .  
Fonte: MEINDL et al. (2004)

Em resumo, a estimativa dos gradientes horizontais contribui principalmente para a melhoria da estimativa de posição na componente horizontal e menor na componente vertical (KARABATIC, 2011).

Na metodologia PPP em que os gradientes horizontais e ZWD são estimados, a configuração da matriz *design* e o vetor dos parâmetros da fase de batimento da onda da portadora e da pseudodistância são obtidos de acordo com Equação 34 (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2017).

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{L_i} \Phi_{rL_i}^{s_j} \\ \Delta PD_{L_i}^{s_j} \end{bmatrix} \right\}_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} \frac{-(X^{s_j} - X_r^0)}{(\rho_r^{s_j})^0} & \frac{-(X^{s_j} - X_r^0)}{(\rho_r^{s_j})^0} \\ \frac{-(Y^{s_j} - Y_r^0)}{(\rho_r^{s_j})^0} & \frac{-(Y^{s_j} - Y_r^0)}{(\rho_r^{s_j})^0} \\ \frac{-(Z^{s_j} - Z_r^0)}{(\rho_r^{s_j})^0} & \frac{-(Z^{s_j} - Z_r^0)}{(\rho_r^{s_j})^0} \\ 1 & 1 \\ f_{wet}(\epsilon) & f_{wet}(\epsilon) \\ f m_g * \text{sen}(AZ) & f m_g * \text{sen}(AZ) \\ f m_g * \text{cos}(AZ) & f m_g * \text{cos}(AZ) \\ \lambda_{L_i} & 0 \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ c dt_r \\ ZWD \\ G_{EW} \\ G_{NS} \\ N_{L_i}^{s_j} \end{bmatrix}_{8 \times 1} \quad (34)$$

Em que:

- $E\{\cdot\}$ : caracteriza o operador de esperança matemática;
- $X_r^0, Y_r^0, Z_r^0$ : Coordenadas aproximadas do receptor GNSS;
- $X^{sj}, Y^{sj}, Z^{sj}$ : Coordenadas do satélite  $J$ ;
- $\rho_r^{sj}$ : Distância geométrica entre as antenas do satélite e o receptor;
- $\Delta\lambda_{L_i} \Phi_{rL_i}^{sj}$ : Diferença entre a fase observada e a calculada, em metros;
- $\Delta PD_{L_i}^{sj}$ : Diferença entre a pseudodistância observada e a calculada, em metros.

### 4.3. Sistemas de referência geodésicos modernos

Um sistema de referência geodésico moderno considera em sua definição a aplicação de um elipsoide de revolução cuja origem e o eixo de revolução coincidem com o centro de massa e com o eixo de rotação da Terra, respectivamente. Além disso, a sua materialização é estabelecida a partir de uma rede de estações geodésicas com coordenadas tridimensionais (SNAY & SOLER, 1999). Como exemplos de referenciais geodésicos modernos, podem ser citados: ITRF (*Internacional Terrestrial Reference Frame*), IGB08, IGS14 e o SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

O elipsoide de referência recomendado pela Associação Internacional de Geodésia (IAG) é o GRS80 (*Geodetic Reference System, 1980*). Já o ITRS (*International Terrestrial Reference System*) se ajusta como referencial terrestre teórico, sendo visto como o referencial geodésico mais acurado atualmente (IERS, 2016a). Em resumo, a definição conceitual de como o sistema de coordenadas é formado, é apresentada a seguir, e ilustrado na Figura 10:

- Origem: Centro de massa da Terra, incluindo oceano e atmosfera;
- Orientação equatorial é definida pelo *BIH (Bureau International de l'Heure)* na época 1984,0, sendo que sua evolução temporal é garantida pela

“Não-Rotação-da Rede” (*No-Net-Rotation*) com relação aos movimentos tectônicos (McCARTHY, 1996);

- Eixo Z: Polo terrestre convencional (CTP), definido pelo *BIH* (época 1984,0) com base nas coordenadas adotadas pelas estações *BIH*;
- Eixo X: Interseção do meridiano de referência do IERS denominado IRM (*International Reference Meridian*) com o plano que passa pela origem e normal ao eixo Z. O IRM coincide com o meridiano zero definido pelo *BIH* (época 1984,0) com base nas coordenadas adotadas pelas estações *BIH*;
- Eixo Y: Torna o sistema dextrogiro.

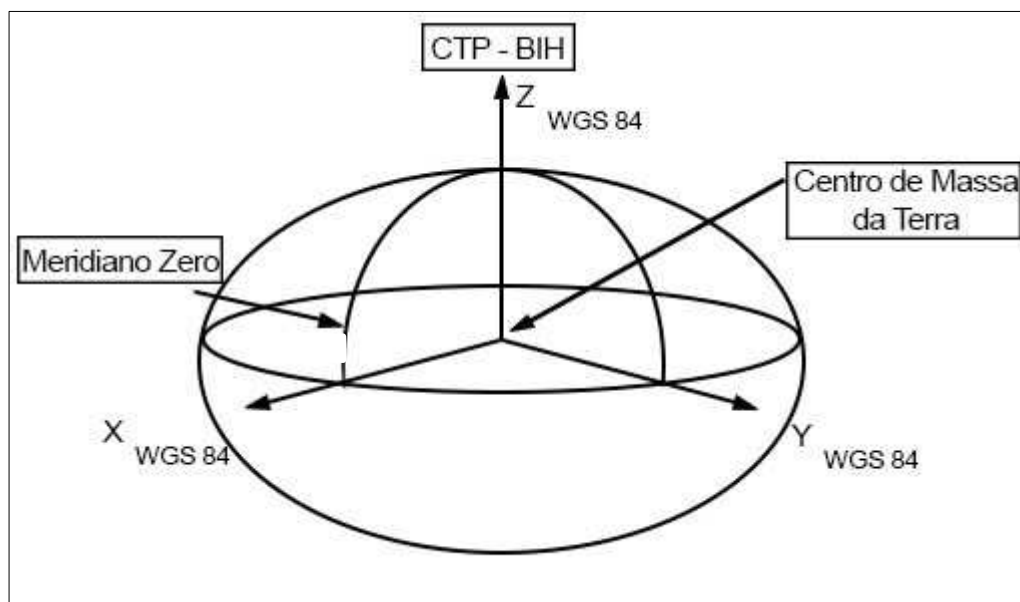


Figura 10- Figura ilustrativa do referencial terrestre.  
Fonte: Monico (2008) e Seeber (2003).

O ITRF é a materialização do ITRS, através de um conjunto de coordenadas e de velocidades lineares de estações, em uma dada época, e parâmetros de orientação da Terra (EOP) fornecidos pelos Centros Técnicos do IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*). Para obtenção dos parâmetros de orientação, o IERS emprega quatro técnicas geodésicas, sendo elas: VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*); SLR (*Satellite Laser Ranging*); GNSS e DORIS (*Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite*) (IERS, 2016b).

Atualmente, existem 13 realizações ITRS, sendo elas: ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF95, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008 e a mais recente o ITRF2014 (IERS, 2016c).

As efemérides precisas para os sistemas GPS e GLONASS se encontravam associadas ao referencial geodésico IGB08 até a semana GPS 1933 (IGS,2017). O IGB08 foi disponibilizado pelo IGS com base na realização do ITRF2008, e uma correção adicional nas coordenadas de 65 estações afetadas por diferentes modelos de calibração de antenas. Em nível global, o ITRF2008 e o IGB08 são equivalentes, compartilhando a mesma origem, escala e orientação (BRUYNINX et al., 2013).

No entanto, o IGS adotou no final de janeiro de 2017 (semana GPS 1934) o mais novo referencial, denominado IGS14. Este referencial é baseado na última materialização do ITRS (*International Terrestrial Reference System*), o ITRF2014 (REBISCHUNG & SCHMID, 2016). Em vista disso, desde do dia 29 de janeiro de 2017, as coordenadas dos satélites obtidas por meio da utilização das efemérides precisas do IGS se encontram referidas ao IGS14 (IGS, 2017). E conseqüentemente, todo o serviço de Posicionamento Por Ponto Preciso *online*, passou a fornecer as coordenadas estimadas referenciadas ao IGS14.

Desde 25 de fevereiro de 2005, por meio da resolução 01/2005 da presidência do IBGE, o sistema de referência oficial do Brasil é o SIRGAS. Esse sistema tem sua realização no ano 2000 e época de referência 2000,4. Desta forma, as coordenadas de referências das estações GNSS pertencentes à RBMC, se encontram nesse referencial e época. Portanto, o serviço *online* IBGE-PPP realiza o processo de transformação de referencial e atualização de coordenadas, para disponibilizar as coordenadas estimadas (atualmente referidas ao IGS14, na época de rastreamento) no sistema e época oficial do Brasil (SIRGAS 2000, época 2000,4). O SIRGAS possui três realizações, sendo elas:

- SIRGAS95: Empregou 58 estações observadas com GPS e distribuídas pelo continente, durante o período de 26 de maio a 4 de junho de 1995. As coordenadas finais desta realização estão referenciadas ao ITRF94 época 1995,4 (SIRGAS, 2017c).

- SIRGAS2000: Utilizou 184 estações distribuídas na América do Sul e Central, no período de 10 a 19 de maio de 2000. As coordenadas finais desta realização estão referenciadas ao ITRF2000 na época 2000,4 (SIRGAS, 2017d). Desta forma, como o SIRGAS2000 é uma densificação regional do ITRF2000, portanto, consideram-se compatíveis os dois sistemas de referência (SIRGAS, 2017a, WESTON & SOLER, 2012).
- SIRGAS-CON: Rede de Referência Contínua SIRGAS composta por cerca de 400 estações GNSS de operações contínua. A rede SIRGAS-CON disponibiliza coordenadas semanais ajustadas ao ITRF, com época na quarta-feira ao meio dia de cada semana (SIRGAS, 2017e). A Figura 11 ilustra a Rede de Referência Contínua SIRGAS.

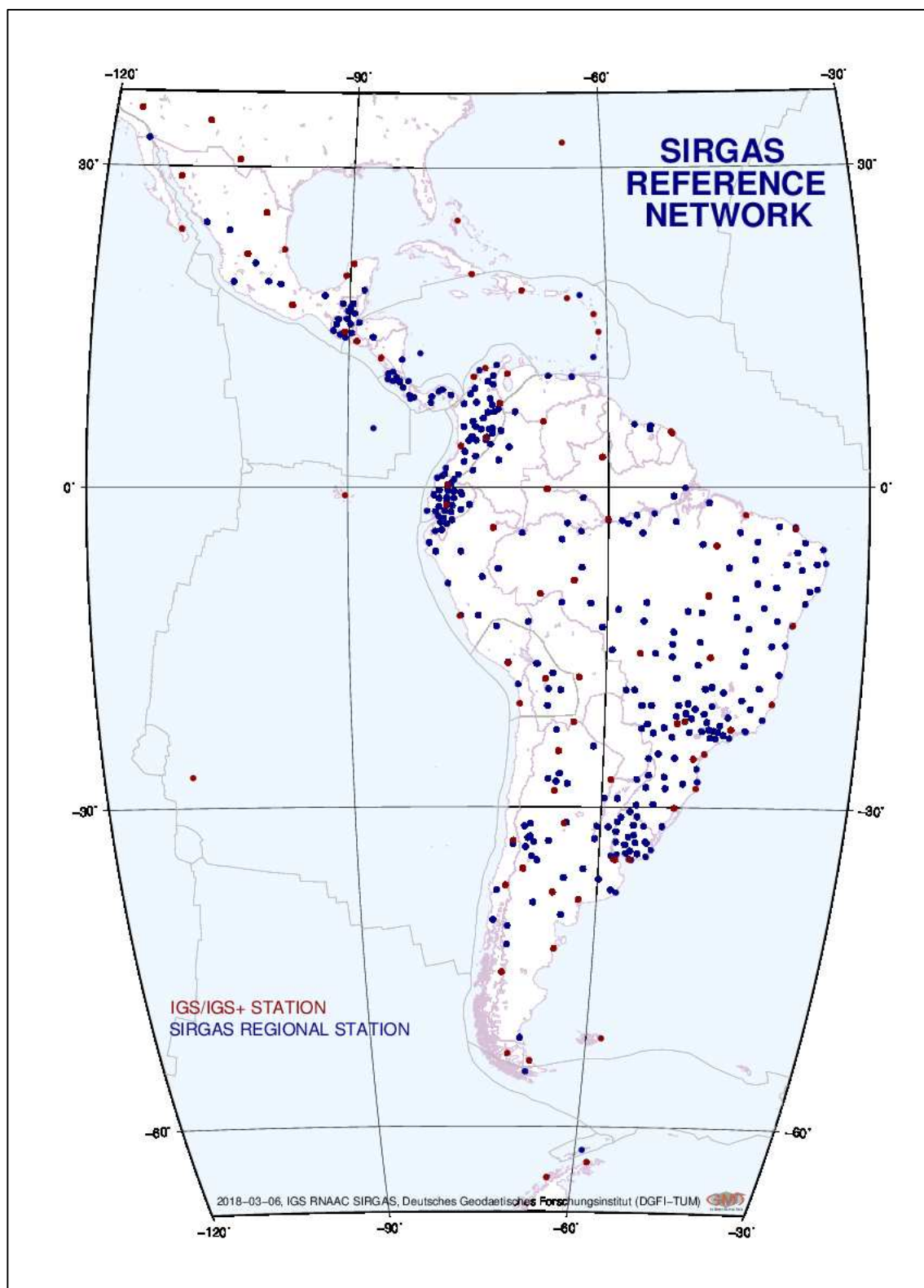


Figura 11 - Rede de Referência Contínua SIRGAS.  
 Fonte: (SIRGAS, 2017e).

#### 4.4. Transformação de referenciais e atualização de coordenadas

O processo de transformação de referencial e atualização de coordenadas tem como objetivo compatibilizar os sistemas de referência e épocas, visto que, em aplicações geodésicas de alta precisão é necessário considerar o efeito de deslocamento de placa tectônica ao longo do tempo (SAPUCCI & MONICO, 2000). Desta maneira, as etapas do processo de transformação e atualização de coordenadas consistem em:

- Atualizar os parâmetros de transformação para a época de interesse;
- Realizar a transformação de coordenadas, e,
- Atualizar as coordenadas.

A atualização dos parâmetros da época inicial  $t_0$  para a época  $t$ , pode ser obtida através da seguinte expressão (ITRF, 2016) e (MONICO, 2008):

$$P(t) = P_{t_0} + \dot{P}_{(t-t_0)} \rightarrow \begin{pmatrix} T_X(t) \\ T_Y(t) \\ T_Z(t) \\ S(t) \\ \zeta_X(t) \\ \zeta_Y(t) \\ \zeta_Z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_X(t_0) \\ T_Y(t_0) \\ T_Z(t_0) \\ S(t_0) \\ \zeta_X(t_0) \\ \zeta_Y(t_0) \\ \zeta_Z(t_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{S} \\ \dot{\zeta}_X \\ \dot{\zeta}_Y \\ \dot{\zeta}_Z \end{pmatrix} (t - t_0) \quad (35)$$

Em que:

- $\dot{P}$ : É a taxa de variação dos parâmetros.
- $\vec{T}$ : É o vetor das translações em X, Y e Z entre os dois referenciais, dadas em metros;
- $S$ : É o fator de escala entre os dois referenciais, adimensional, dado em ppm;
- $\zeta$ : É a matriz das rotações diferenciais em torno dos eixos X, Y e Z, dadas em radianos;
- $\dot{T}, \dot{S}$  e  $\dot{\zeta}$ : São as taxas de variações em translação, fator de escala, e

rotação no ITRF com relação ao tempo.

Em seguida, realiza-se a transformação entre os sistemas de referência, por meio de três translações, três rotações e um fator de escala. De acordo com IERS (2010), a expressão matemática para transformar as coordenadas no sistema origem (o) para o sistema destino (d) é dado pela Equação 36, sendo que as coordenadas dos pontos nos dois sistemas devem estar na mesma época.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S & -\zeta_Z & \zeta_Y \\ \zeta_Z & S & -\zeta_X \\ -\zeta_Y & \zeta_X & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_o \quad (36)$$

A última etapa refere-se à atualização das coordenadas das estações da época ( $t_0$ ) para a época de interesse ( $t$ ) pode ser realizada de acordo com as Equações 37, 38 e 39 (SIRGAS, 2017b):

$$X_{(t)} = X_{(t_0)} + V_X(t - t_0) \quad (37)$$

$$Y_{(t)} = Y_{(t_0)} + V_Y(t - t_0) \quad (38)$$

$$Z_{(t)} = Z_{(t_0)} + V_Z(t - t_0) \quad (39)$$

Em que:

- $t$ : época de interesse;
- $t_0$ : época de origem;
- $X_{(t_0)}, Y_{(t_0)}, Z_{(t_0)}$ : coordenadas cartesianas geocêntricas de uma estação na época de origem;
- $X_{(t)}, Y_{(t)}, Z_{(t)}$ : coordenadas cartesianas geocêntricas de uma estação na época de destino.
- $V_X, V_Y$  e  $V_Z$  : Vetor velocidade do ponto  $X_{(t_0)}, Y_{(t_0)}, Z_{(t_0)}$ , na época de origem.

Em relação às velocidades das estações necessárias no processo de atualização, as mesmas podem ser obtidas a partir de algum modelo de campo de velocidade. A este respeito, a UNAVCO (*University NAVstar Consortium*) disponibiliza para a placa litosférica Sul-Americana 14 modelos de velocidade. Entretanto, o SIRGAS recomenda o emprego do modelo VEMOS (*VELOCITY*

*Model Of Sirgas*), sendo este referenciado ao ITRF2005 (DREWES & HEIDBACH, 2012; RAMOS, 2015; CARVALHO, 2015).

Além disto, caso haja necessidade de mudança do referencial das velocidades, emprega-se a Equação 40 (SOLER & SNAY, 2004):

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_{t_0} + \begin{bmatrix} \dot{T}_x \\ \dot{T}_y \\ \dot{T}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{S} & -\dot{\zeta}_z & \dot{\zeta}_y \\ \dot{\zeta}_z & \dot{S} & -\dot{\zeta}_x \\ -\dot{\zeta}_y & \dot{\zeta}_x & \dot{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t_0} \quad (40)$$

Sendo que todos os elementos já foram descritos anteriormente.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. Materiais e Área de Estudo

Neste estudo foram utilizadas as soluções finais de órbitas e correções de relógio dos satélites, e parâmetros de orientação da Terra do IGS. Além dos arquivos DCBs (*Differential Code Biases*) e os mapas ionosféricos do CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*). Já os parâmetros do modelo de cargas oceânicas foram obtidos a partir do *web-service* disponível em: <http://holt.oso.chalmers.se/loading>. O arquivo de carga de pressão atmosférica foi gerado empregando o software BERNESE GNSS, usando modelo de Ray & Ponte (2003).

Também foram utilizados os coeficientes da VMF1 (VMF1, 2017). Esses parâmetros são fornecidos em um grid global (2,0° de latitude x 2,5° longitude) a cada seis horas, que é a resolução temporal usual de dados do ECMWF.

O processamento das observáveis GNSS foi realizado no BERNESE GNSS software v5.2. O BERNESE GNSS é um pacote de softwares científicos, e foi concebido e desenvolvido pelo Instituto Astronômico da Universidade de Berna, Suíça, sendo amplamente empregado para estimativas de redes geodésicas de alta qualidade (DACH et al., 2015).

A rotina para transformação de referenciais e atualização de coordenadas, além dos cálculos das discrepâncias, precisão, e acurácia planimétricas e altimétricas foram realizados empregando o software Matlab versão R2012b.

Como o Brasil é um país com características continentais, com distintos climas, e diferentes índices de umidade do ar e temperatura, ao longo de sua extensão e do ano, procurou-se realizar experimentos em cada uma das regiões geográficas brasileiras: Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul. Desta forma, foram selecionadas 89 estações GNSS da RBMC, as Figuras 12 e 13 ilustram a distribuição espacial das mesmas, e a Tabela 4 contém a descrição dos números de estações por região.



Figura 12 - Espacialização das estações GNSS no Brasil.

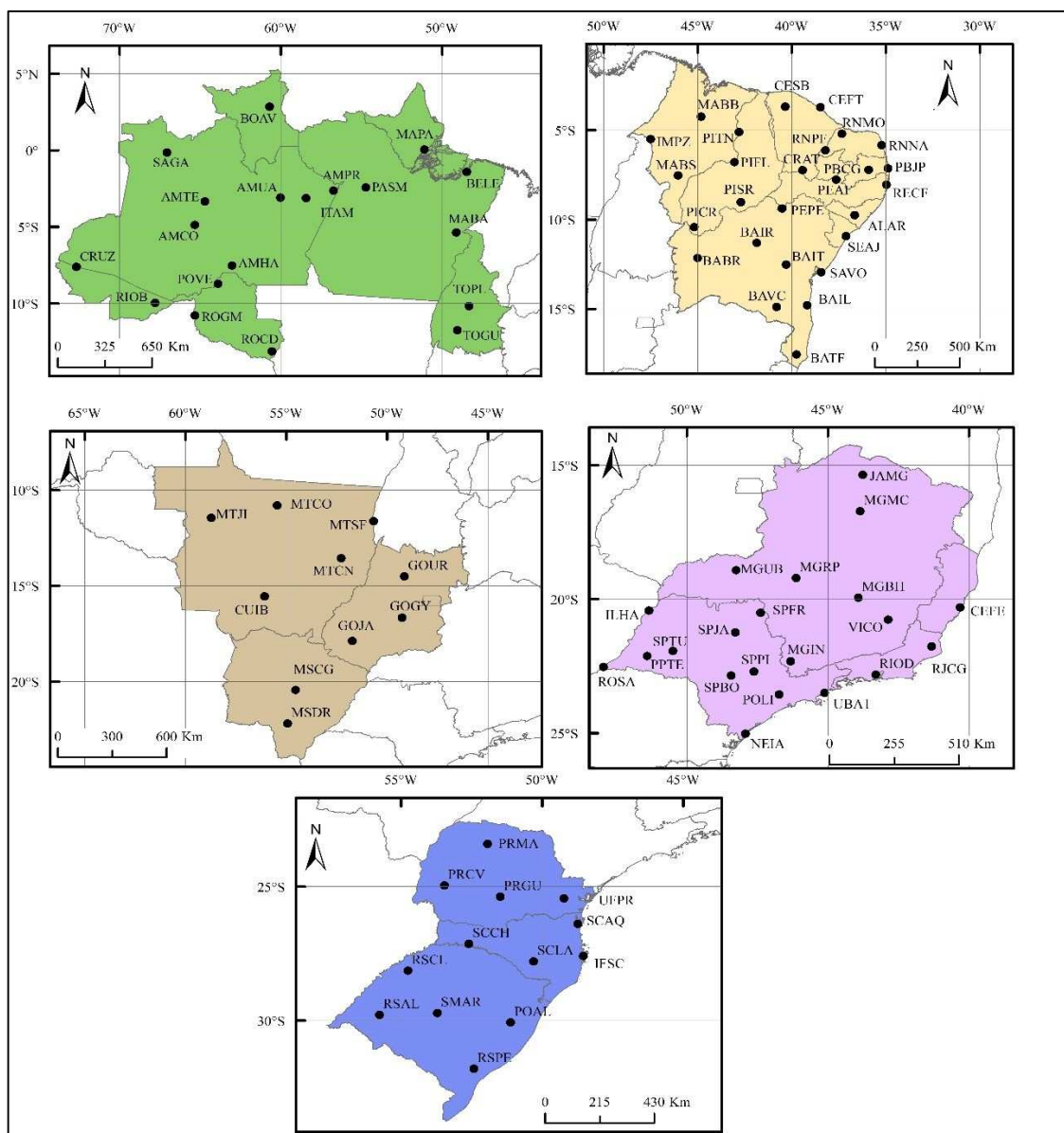


Figura 13 - Especialização das estações GNSS por região geográfica.

Tabela 4 - Descrição do número de estações GNSS por região

Região	Números de Estações
Centro-Oeste	10
Nordeste	26
Norte	19
Sudeste	21
Sul	13

Salienta-se que algumas estações da RBMC não foram inseridas neste estudo, devido à falta de dados nos dias escolhidos para o processamento, ou a

proximidade com outras estações, e a não disponibilidade das coordenadas semanais destas estações pela Rede SIRGAS-CON.

## 5.2. Metodologia

O Fluxograma representado na Figura 14 resume os passos metodológicos empregados neste estudo. Uma descrição resumida dos principais passos é apresentada na sequência.

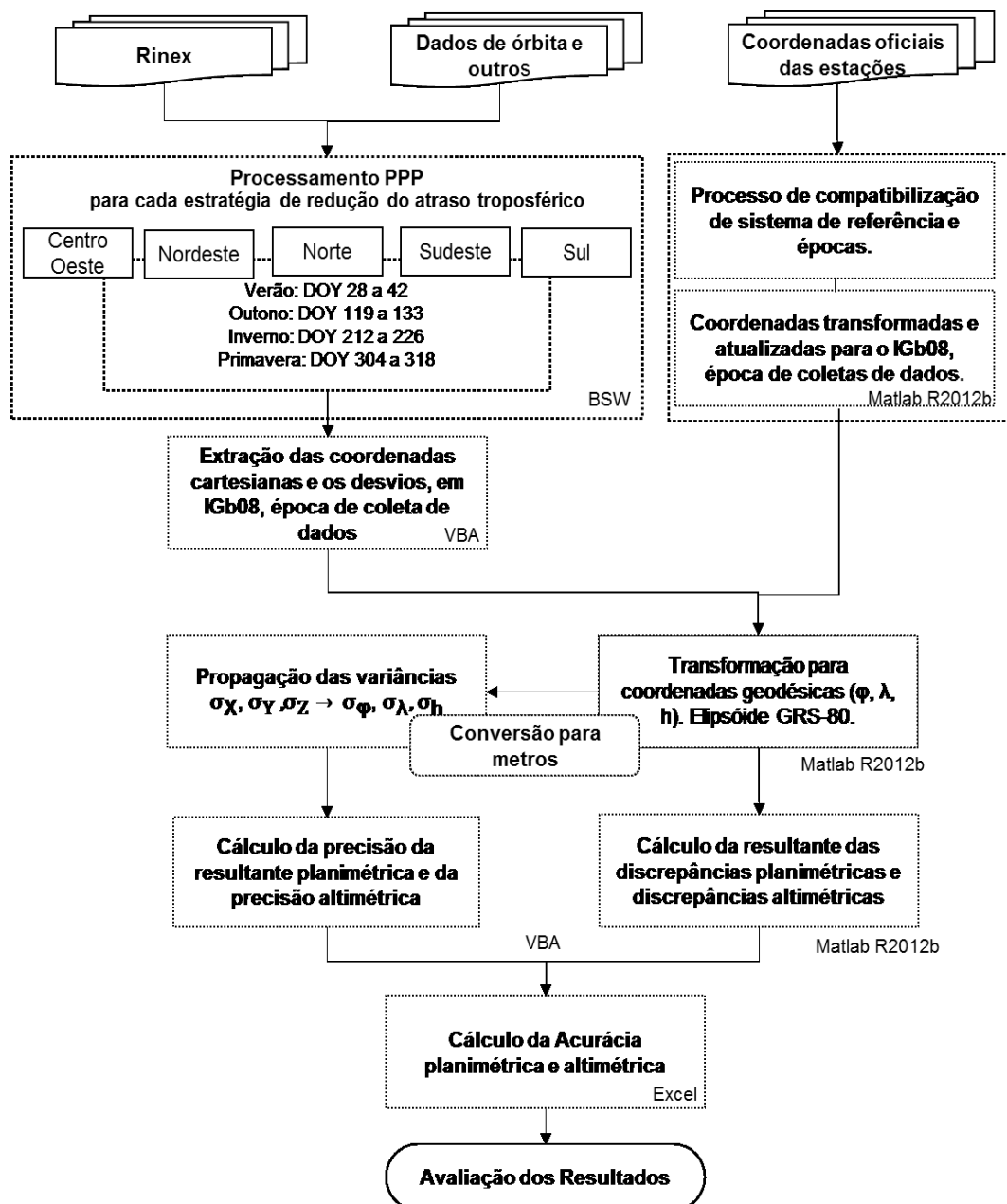


Figura 14 - Fluxograma da metodologia aplicada neste estudo.

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas observáveis GNSS (arquivos RINEX) com o intervalo de rastreo de 24 horas, para 60 dias do ano de 2016, distribuídos igualmente para cada estação do ano. Portanto, foram processados dados coletados durante 15 dias contínuos de observações GNSS no verão, outono, inverno e primavera (Tabela 5).

Tabela 5 - Períodos selecionados para o processamento em cada estação do ano.

<b>Estação do Ano</b>	<b>Intervalo de processamento</b>	<b>DOY</b>	<b>Época Média</b>
Verão	28/01/2016 a 11/02/2016	28 a 42	2016,096
Outono	28/04/2016 a 12/05/2016	119 a 133	2016,344
Inverno	30/07/2016 a 13/08/2016	212 a 226	2016,598
Primavera	30/10/2016 a 13/11/2016	304 a 318	2016,956

O BSW oferece vários modelos a priori e funções de mapeamento correspondentes para correção da refração troposférica. Na versão 5.2 estão disponíveis os seguintes modelos para análise de dados GNSS:

- A função de mapeamento Global - GMF (hidrostática e úmida), em que as correções de ZTD são calculadas com base no modelo Global de Pressão e Temperatura (GPT) e no modelo Saastamoinen;
- A função de Mapeamento de Viena - VMF1 (hidrostática e úmida), juntamente com as correções ZTD baseadas no ECMWF;
- O modelo de Niell (hidrostático e úmido), onde as correções ZTD são calculadas com base no modelo Saastamoinen juntamente com as funções de mapeamento Niell (recomendado para análise de dados GNSS com ângulo elevação baixo);
- O modelo Saastamoinen;
- O modelo modificado de Hopfield (GOAD & GOODMAN, 1974);
- O modelo baseado em fórmulas de Essen e Froome (ROTHACHER et al., 1986).

Desta forma, foram criadas cinco campanhas no BSW referente aos processamentos para cada região geográfica do Brasil. A Tabela 6 apresenta

um resumo de alguns parâmetros empregados nos processamentos executados no BSW.

Tabela 6 - Parâmetros de processamento no software BERNESE GNSS 5.2

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
Intervalo das observações	30 segundos
Produtos orbitais	IGS e IGL finais / precisos
Modelo de cargas oceânicas	FES 2004
Marés Terrestres	IERS, 2010
Modelo de carga atmosférica	Ray & Ponte ( 2003)
<i>Offset</i> do centro de fase dos satélites	PCV.I08 (ANTEX <i>format</i> )
<i>Offset</i> do centro de fase dos receptores	PCV.I08 (ANTEX <i>format</i> )
Máscara de elevação	3°
<i>Reference Frame</i>	ITRF2008
Sistemas GNSS	GPS e GLONASS
Ionosfera	Combinação linear livre da ionosfera
Funções de Mapeamento	GMF, NIELL, VMF1, Hopfield, $\frac{1}{\cos Z}$
Modelo de Gradiente	CHENHER (Chen & Herring, 1997)
Método de processamento	PPP

Há uma grande correlação ao estimar em conjunto os parâmetros da troposfera, altura da estação e relógios do receptor. Essa correlação diminui abaixando o ângulo de corte de elevação e assumindo uma distribuição uniforme dos satélites GNSS (DACH et al., 2015). Por esse motivo, foi escolhido o valor de 3° de máscara de elevação em todas as estratégias de processamento, de forma a considerar observações de satélites próximos ao horizonte. Entretanto, quando se utiliza medidas com baixos ângulos de elevação, é recomendável a estimativa de gradientes troposféricos horizontais, o que também foi considerado nas estratégias.

Com objetivo de analisar o impacto dos diferentes modelos troposféricos no PPP foram investigadas várias estratégias para solução final, de acordo com os modelos e funções de mapeamento disponíveis no BSW. Na Tabela 7 são apresentadas as estratégias de processamento executadas no BSW referentes a mitigação do atraso troposférico.

Tabela 7- Estratégias de processamento para mitigação do atraso troposférico.

<b>Estratégia</b>	<b>Modelo troposférico a priori (modelo + *<i>fm</i>)</b>	<b><i>fm</i> para *ZWD</b>
1	Sem correções troposféricas para ZHD	$\frac{1}{\cos Z}$
2	Saastamoinen	NMF <sub>wet</sub>
3	Hopfield	Hopfield
4	Modelo de Niell ( Saastamoinen com NMF <sub>Dry</sub> )	NMF <sub>wet</sub>
5	GPT com GMF <sub>Dry+Wet</sub>	GMF <sub>wet</sub>
6	ECMWF com VMF1 <sub>Dry+Wet</sub>	VMF1 <sub>wet</sub>
7	Modelo de Niell (Saastamoinen <sub>Dry</sub> com NMF <sub>Dry</sub> )	NMF <sub>wet</sub>
8	GPT <sub>Dry</sub> com GMF <sub>Dry</sub>	GMF <sub>wet</sub>
9	ECMWF <sub>Dry</sub> com VMF1 <sub>Dry</sub>	VMF1 <sub>wet</sub>

\**fm*: função de mapeamento e \*ZWD componente úmida estimada.

Desta forma, para cada estratégia de processamento foi escolhido um modelo a priori associado a uma função de mapeamento para a componente hidrostática do atraso troposférico. Além disso, também foi escolhido uma função de mapeamento para a componente úmida a ser predita com os outros parâmetros no ajustamento. As combinações das funções de mapeamentos para ZHD e ZWD estão de acordo com recomendado pelo manual do software para cada modelo (DACH et al., 2015).

A estratégia 1, em que não foi utilizada um modelo a priori para correção da componente hidrostática, é parcialmente sem correção troposférica (em torno de 90%), visto que a componente úmida foi estimada. Para esta estratégia de processamento foi escolhida a função de mapeamento mais simples ( $\frac{1}{\cos Z}$ ) para a componente úmida.

As estratégias 4 e 7, utilizam o chamado modelo de Niell, que é uma combinação do modelo Saastamoinen e da função de mapeamento de Niell (NMF). Nas estratégias 4, 5 e 6, o modelo a priori é calculado tanto para componente hidrostática quanto para úmida. O manual do BSW recomendam essas estratégias para posicionamento estático rápido. No entanto, essas estratégias foram consideradas neste estudo para efeitos de comparação com as estratégias 7, 8 e 9 em que o modelo a priori é calculado apenas para componente hidrostática.

Destaca-se que neste estudo não foi utilizado o modelo troposférico de Essen & Froome, visto que o mesmo é diferencial, sendo assim aplicado no posicionamento relativo, em que duas ou mais estações coletam dados simultaneamente (HESPER, 1991).

As estratégias 6 e 9 (Tabela 7) utilizam os coeficientes da função VMF1, e como declarado anteriormente, esses parâmetros são fornecidos a cada seis horas. No entanto, o intervalo de processamento das observáveis empregado neste estudo é de 24 horas, portanto, para um dia específico, é necessário concatenar 5 arquivos de coeficientes VMF1 (00, 06, 12, 18 e 00, este último referente ao próximo dia). O arquivo final, concatenado e renomeado, entra como *input* no processamento no BSW, sem alterar ou remover os cabeçalhos dos arquivos intermediários.

Salienta-se que para trabalhar com o grande volume de dados resultantes dos processamentos no BSW, foi empregado um algoritmo para a automatização da extração das coordenadas cartesianas, assim como os seus desvios diretamente dos arquivos gerados em cada estratégia de processamento. O código foi escrito em VBA (*Visual Basic for Applications*) que é uma implementação da linguagem de programação *Visual Basic 6* da *Microsoft* integrada aos aplicativos *Office*, no caso o ambiente *Excel*, de forma a facilitar o manuseio e padronizar a apresentação dos dados.

Para analisar qual estratégia de processamento da Tabela 7 apresentou melhor desempenho, realizou-se a análise da acurácia das coordenadas estimadas para cada modelo de refração troposférica. De acordo com Mikhail & Ackerman (1976) e Monico et al. (2009) o conceito de acurácia se refere ao grau de proximidade de uma estimativa em relação ao seu valor verdadeiro, ao passo que, a precisão indica o grau de dispersão de uma medida em relação a sua média. Enquanto a precisão está relacionada apenas com os efeitos aleatórios, a acurácia vincula-se com os efeitos aleatórios e sistemáticos. O cálculo da acurácia planimétrica e altimétrica pode ser obtido em conformidade com as Equações 41 e 42, respectivamente.

$$A_p = \sqrt{D_{p(\text{metros})}^2 + \sigma_{p(\text{metros})}^2} \quad (41)$$

$$A_h = \sqrt{\Delta_{h(\text{metros})}^2 + \sigma_{h(\text{metros})}^2} \quad (42)$$

Em que:

- $D_p$ : Discrepância planimétrica das coordenadas geodésicas, em metros;
- $\sigma_{p(\text{metros})}$ : Precisão da resultante planimétrica das coordenadas geodésicas, em metros;
- $\Delta_{h(\text{metros})}$ : Discrepância altimétrica, em metros; e
- $\sigma_{h(\text{metros})}$ : Precisão altimétrica, em metros.

Em relação ao cálculo das precisões planimétricas das coordenadas estimadas das estações da RBMC ( $\sigma_p$ ), considera-se a expressão 43.

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{\phi(\text{metros})}^2 + \sigma_{\lambda(\text{metros})}^2} \quad (43)$$

Sendo  $\sigma_{\phi(\text{metros})}$  e  $\sigma_{\lambda(\text{metros})}$  as precisões na latitude e longitude. No entanto, para obter os valores de desvio padrão das coordenadas, é necessário propagar as variâncias (Equação 44), pois o BSW fornece no arquivo SINEX (*Solution INdependent EXchange format*) apenas os desvios padrão para as coordenadas cartesianas (X, Y e Z), e é preciso tê-los para as coordenadas geodésicas curvilíneas ( $\phi, \lambda, h$ ).

$$C_{\phi\lambda h} = J * C_{XYZ(\text{metros})} * J^T \quad (44)$$

em que  $C_{\phi\lambda h}$  é a matriz variância covariância das coordenadas geodésicas,  $C_{XYZ(\text{metros})}$  é a matriz variância covariância das coordenadas cartesianas, e J se refere a matriz jacobiana, dada por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{-\sin\phi * \cos\lambda}{(M+h)} & \frac{-\sin\phi * \sin\lambda}{(M+h)} & \frac{-\cos\phi}{(M+h)} \\ \frac{-\sin\lambda}{(M+h)} & \frac{-\cos\lambda}{(M+h)} & 0 \\ \cos\phi * \cos\lambda & \cos\phi * \sin\lambda & \sin\phi \end{bmatrix} \quad (45)$$

Os desvios-padrão da longitude e latitude fornecidos na MVC  $C_{\phi\lambda h}$  estão em radianos, sendo necessário assim a transformação de suas unidades para metros, através das seguintes expressões:

$$\sigma_{\phi(\text{metros})} = \sigma_{\phi(\text{rad})} * (M + h) \quad (46)$$

$$\sigma_{\lambda(\text{metros})} = \sigma_{\lambda(\text{rad})} * (N + h) * \cos\phi \quad (47)$$

M refere-se ao raio de curvatura da seção meridiana e N o raio de curvatura da seção primeiro vertical, dados por:

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \bar{\phi})^{\frac{3}{2}}} \quad (48)$$

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \bar{\phi})^{\frac{1}{2}}} \quad (49)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (50)$$

Onde:

- $e^2$ : Primeira excentricidade;
- $\bar{\phi}$ : Latitude média das coordenadas estimadas;
- $a = 6.378.137,000$  m ( semieixo maior do GRS80);
- $b = 6.356.752,314$  m ( semieixo menor do GRS80).

As discrepâncias planimétricas e altimétricas são obtidas entre as coordenadas estimadas no BSW e as coordenadas de referência, que são disponibilizadas pelo IBGE em seus respectivos descritivos, no referencial SIRGAS2000, época 2000,4. Contudo, as coordenadas das estações de referência precisam estar no mesmo referencial das coordenadas estimadas, assim como a compatibilidade em termos de época, com o objetivo de reduzir o efeito do deslocamento entre as placas tectônicas.

Como já discutido, as coordenadas dos satélites obtidas por meio da utilização das efemérides precisas do IGS encontravam-se referidas ao IGB08 (ITRF2008) até a semana GPS 1933. Desse modo, as coordenadas estimadas neste estudo estão referenciadas ao IGB08. Assim, as coordenadas de

referência em SIRGAS2000, época 2000.4, das estações da RBMC utilizadas, foram transformadas e atualizadas para o ITRF2008, na época de coleta dos dados, que no caso deste trabalho referem-se ao dia médio das observações analisadas para cada estação do ano informados na Tabela 5.

A Figura 15 ilustra o processo de transformação de referenciais e atualização de coordenadas de referência. Salienta-se que na transformação de referenciais foram empregados os parâmetros de transformação disponibilizados pelo IGN (*Institut National de L'Information Géographique et Forestière*) (IGN, 2017). Esses parâmetros de transformação permitem transformar o referencial e atualizar as coordenadas entre os vários ITRFs. Neste caso, considera-se a compatibilidade entre o IGB08 e o ITRF2008 (BRUYNINX et al., 2013), e entre o SIRGAS2000 e o ITRF2000 (WESTON & SOLER, 2012).

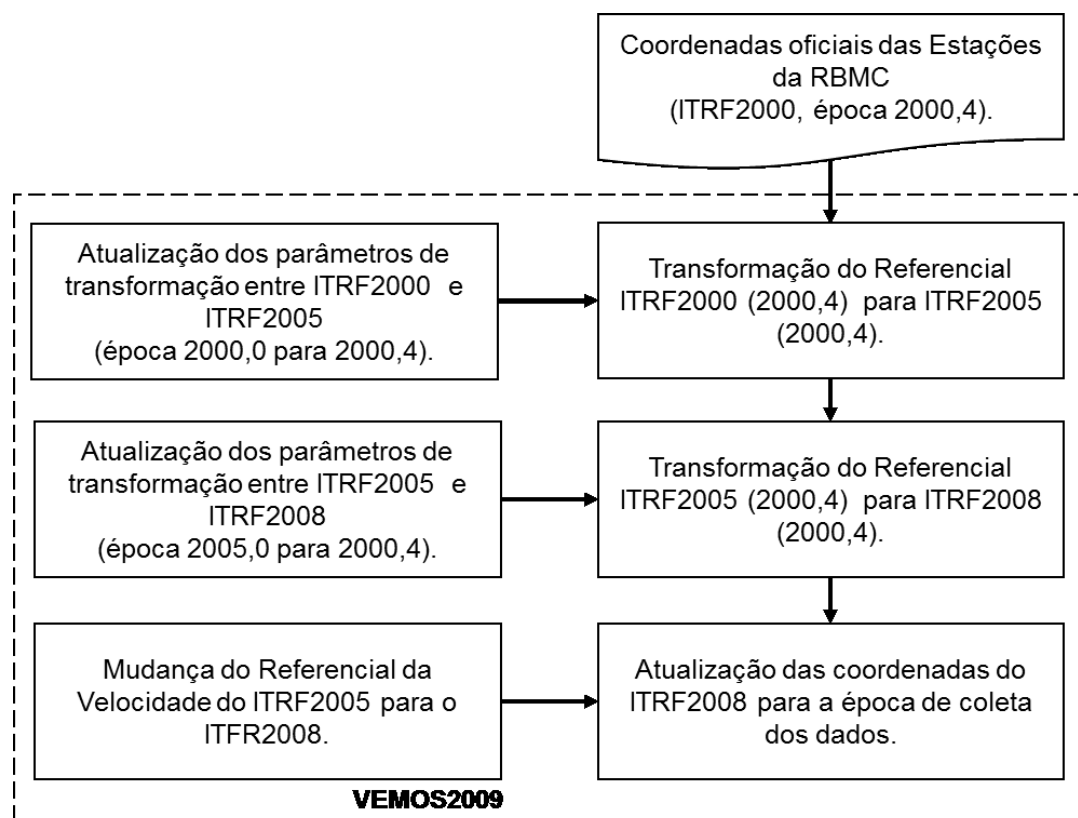


Figura 15 - Fluxograma do processo de transformação de referencial e atualização das coordenadas de referência.

Os parâmetros de transformação que relacionam o ITRF2005 e o ITRF2000, na época 2000,0, são fornecidos por Altamimi et al. (2007). Analogamente, parâmetros de transformação que relacionam o ITRF2008 e o ITRF2005, na época 2005,0, são fornecidos por Altamimi et al. (2012).

As componentes do vetor velocidade das estações ( $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$ ), necessárias para a atualização de coordenadas foram calculadas empregando o modelo VEMOS2009 (modelo de velocidades para América do Sul e Caribe). Este modelo corresponde a uma grade de  $1^\circ \times 1^\circ$  com velocidade horizontal conhecida (DREWES & HEIDBACH, 2012). Salienta-se que, devido ao VEMOS calcular as velocidades referenciadas ao ITRF2005, foi necessário realizar a mudança de referencial de velocidade do ITRF2005 para o ITRF2008.

Visto que todas as coordenadas estimadas estão referenciadas ao IGB08 e são cartesianas, empregou-se a transformação das coordenadas cartesianas para coordenadas geodésicas ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ), no mesmo referencial, sendo o elipsoide de referência o GRS80. Esta etapa também foi implementada no software *Matlab* versão R2012b pelo método direto proposto por Bowring (1976).

No cálculo da discrepância da resultante planimétrica, foram utilizadas as coordenadas geodésicas ( $\phi$ ,  $\lambda$ ). As Equações 51 a 53 demonstram como foram obtidas as discrepâncias da resultante planimétrica em unidades métricas, considerando o elipsoide GRS80.

$$\begin{vmatrix} \Delta\phi(\text{graus}) \\ \Delta\lambda(\text{graus}) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \phi(\text{estimada}) - \phi(\text{referência}) \\ \lambda(\text{estimada}) - \lambda(\text{referência}) \end{vmatrix} \quad (51)$$

Na Equação 51 as discrepâncias são obtidas em radianos, tornando necessária a conversão para metros, de acordo com a expressão 52 (TORGE, 2001):

$$\begin{vmatrix} \Delta\phi(\text{metros}) \\ \Delta\lambda(\text{metros}) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M * \Delta\phi(\text{rad}) \\ N * \cos\phi * \Delta\lambda(\text{rad}) \end{vmatrix} \quad (52)$$

Enfim, a discrepância planimétrica em metros é dada pela Equação 53:

$$D_p = \sqrt{\Delta\phi(\text{metros})^2 + \Delta\lambda(\text{metros})^2} \quad (53)$$

Adjacente, a discrepância altimétrica em metros é obtida através da Equação 54:

$$\Delta h(\text{metros}) = h(\text{estimada}) - h(\text{referência}) \quad (54)$$

## **6. RESULTADOS E ANÁLISES**

Neste capítulo são apresentados os gráficos e análises realizados nessa pesquisa em relação as diversas estratégias para redução da refração troposférica, bem como a influência na acurácia do posicionamento GNSS.

### **6.1. Avaliação da acurácia das coordenadas estimadas**

No intuito de verificar qual o desempenho de cada modelo de refração troposférica, foram calculadas a acurácia planimétrica e altimétrica para as 89 estações da RBMC no período de 15 dias, para cada estação do ano de 2016. De modo apresentar os dados de uma maneira mais concisa, serão apresentados a seguir os histogramas da acurácia planimétrica, e posteriormente os da acurácia altimétrica, em metros, de acordo com cada modelo de refração troposférica identificados na Tabela 7. Os intervalos e número de classes dos histogramas foram escolhidos para facilitar a comparação entre as amostras de acurácia.

Destaca-se que os valores de acurácia planimétrica e altimétrica referente a todas as estações GNSS empregadas neste estudo, no período de processamento de 60 dias, constituem uma amostra de 5340 valores de posições por estratégia de processamento, sendo: 600 para região Centro-Oeste, 1560 para região Norte, 1140 para região Nordeste, 1260 para região Sudeste, e 780 para região Sul. Portanto, neste trabalho foram estimadas 48060 posições ao todo. No Apêndice 3 deste estudo estão os histogramas de frequências da precisão planimétrica e altimétrica; já no Apêndice 4 se encontram os histogramas de frequências das discrepâncias planimétricas e altimétricas.

### 6.1.1. Acurácia da resultante planimétrica

A Figura 16 mostra o histograma de frequências da resultante planimétrica da acurácia, em metros, referente a estratégia 1, em que não foi utilizado um modelo a priori para correção da componente hidrostática. No entanto, os parâmetros da componente úmida do atraso troposférico foram estimados no ajustamento.

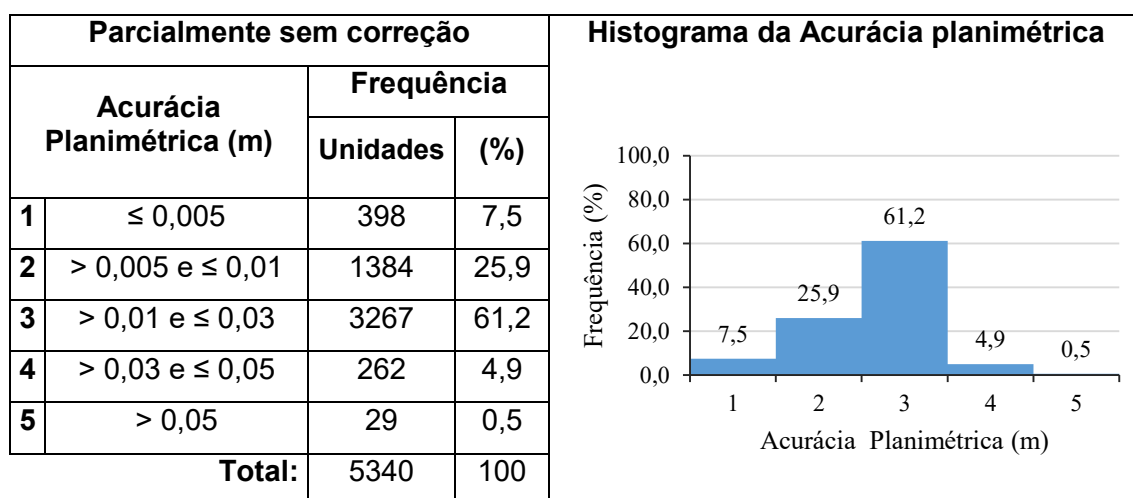


Figura 16 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 1.

Na estratégia 1 foi empregada a função de mapeamento  $\frac{1}{\cos Z}$  para a componente úmida. Pode se notar na Figura 16 que 94,6% dos resultados são menores que 0,03m. No entanto, 0,5% dos valores foram superiores a 5cm (0,05m a 0,18m).

A Figura 17 mostra o histograma de frequências da resultante planimétrica da acurácia referente a estratégia 2. Nesta estratégia foi utilizado o modelo a priori Saastamoinen para correção da componente hidrostática, e a função de mapeamento  $NMF_{Wet}$  para a componente úmida estimada. Salienta-se que no modelo de Saastamoinen, as funções de mapeamento são implícitas.

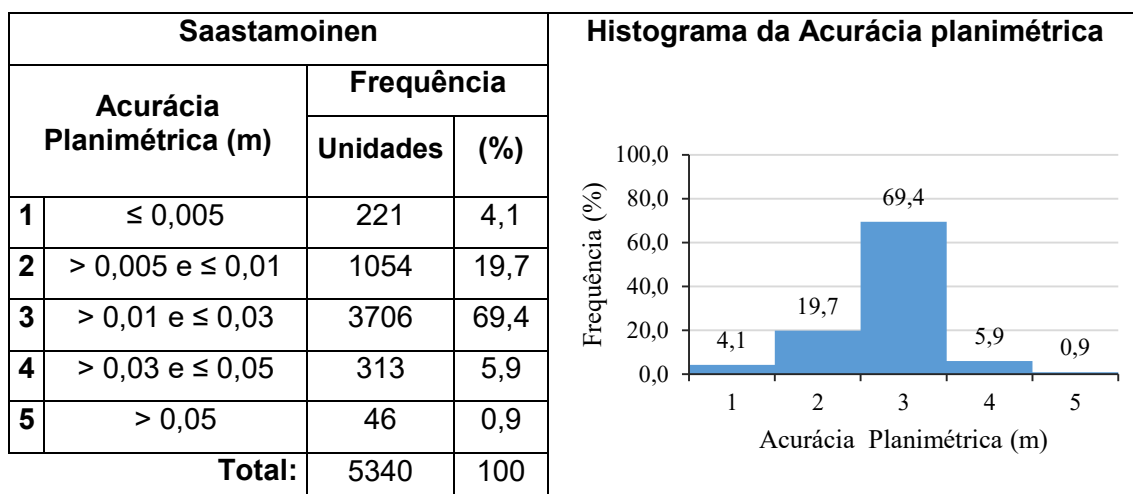


Figura 17 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 2.

Analisando o histograma da Figura 17, nota-se que da amostra de 5340 valores, 93,2% dos resultados são menores que 0,03m, sendo 23,9% inferiores a 1cm. Já 0,9% da amostra apresentou valores superiores a 5cm (0,05m a 0,12m).

A Figura 18 mostra o histograma de frequências da resultante planimétrica da acurácia referente a estratégia 3. Nesta estratégia foi utilizado o modelo a priori Hopfield para correção da componente hidrostática, e a função de mapeamento Hopfield para a componente úmida estimada.

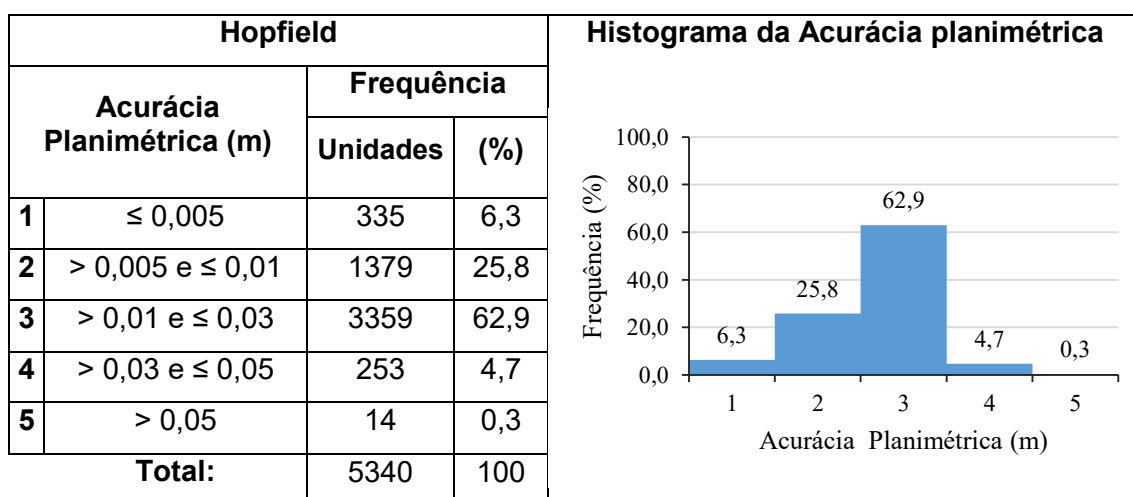


Figura 18 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 3.

Verifica-se que para o histograma referente a resultante planimétrica da acurácia da estratégia 3 (Figura 18), 95% da amostra de 5340 valores apresentaram valores inferiores a 3cm, já 32,1% da amostra obteve acurácia

planimétrica inferior a 1cm. Apenas 0,3% da amostra apresentou valores superiores a 5cm (0,05m a 0,11m).

O histograma da resultante planimétrica da acurácia da Figura 19, refere-se ao processamento empregando o modelo a priori de Niell (Saastamoinen em conjunto  $NMF_{Dry}$ ). Para a componente úmida estimada foi utilizada a função de mapeamento  $NMF_{Wet}$ .

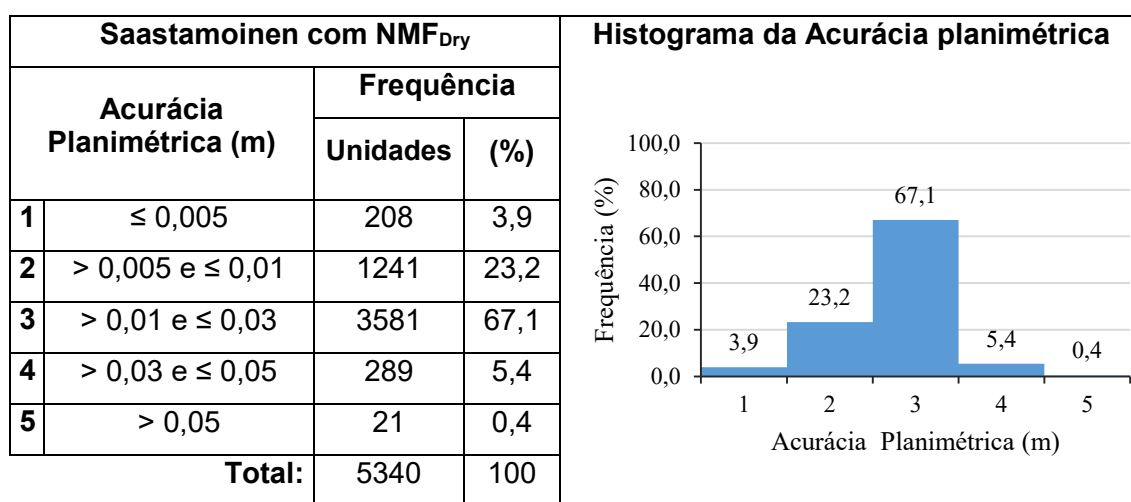


Figura 19 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 4.

No histograma referente a estratégia 4 (Figura 19), 94,2% das discrepâncias foram menores que 3cm. Além disso, somente 3,9% dos valores alcançaram valores menores que 5mm. A porcentagem da amostra que apresentou valores superiores a 5cm (0,05m a 0,12m) foi de 0,4%.

A Figura 20 representa o histograma de frequências da acurácia planimétrica, em que foi empregado o modelo a priori GPT, associado a função de mapeamento  $GMF_{Dry+Wet}$ . Em relação a componente úmida estimada no ajustamento, foi utilizado a função de mapeamento  $GMF_{Wet}$ .

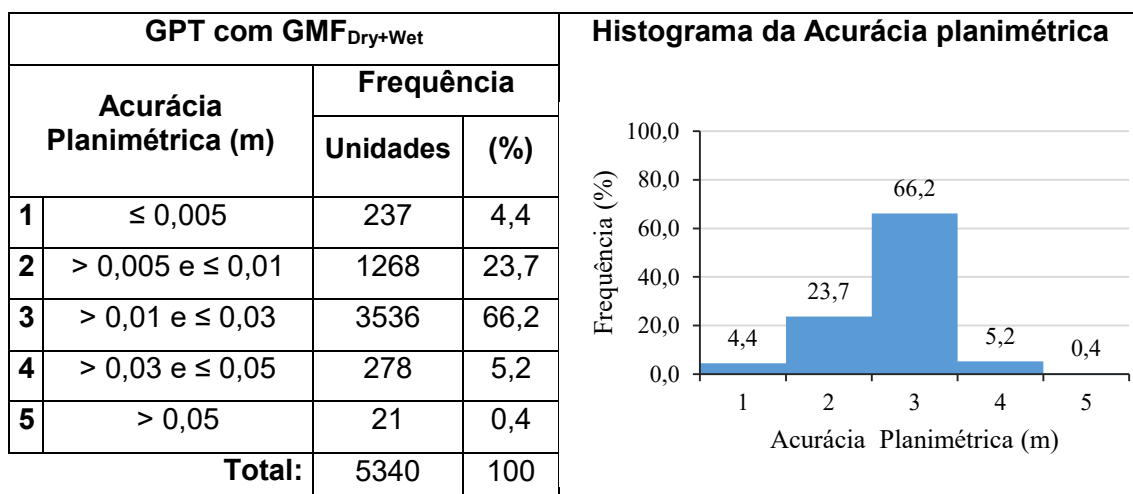


Figura 20 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 5.

Nota-se que para estratégia 5 (Figura 20), 94,4% da amostra obteve acurácia da resultante planimétrica inferior a 3cm. Além disto, para este modelo de refração troposférica, apenas 0,4% dos valores de acurácia foi superior a 5cm (0,05m a 0,09m).

O histograma de frequências da Figura 21 refere-se os valores de acurácia das resultantes planimétricas para a estratégia de processamento em que foi utilizado o modelo a priori ECMWF associado a função de mapeamento VMF1<sub>Dry+Wet</sub>. A função de mapeamento VMF1<sub>Wet</sub> foi usada para a componente úmida.

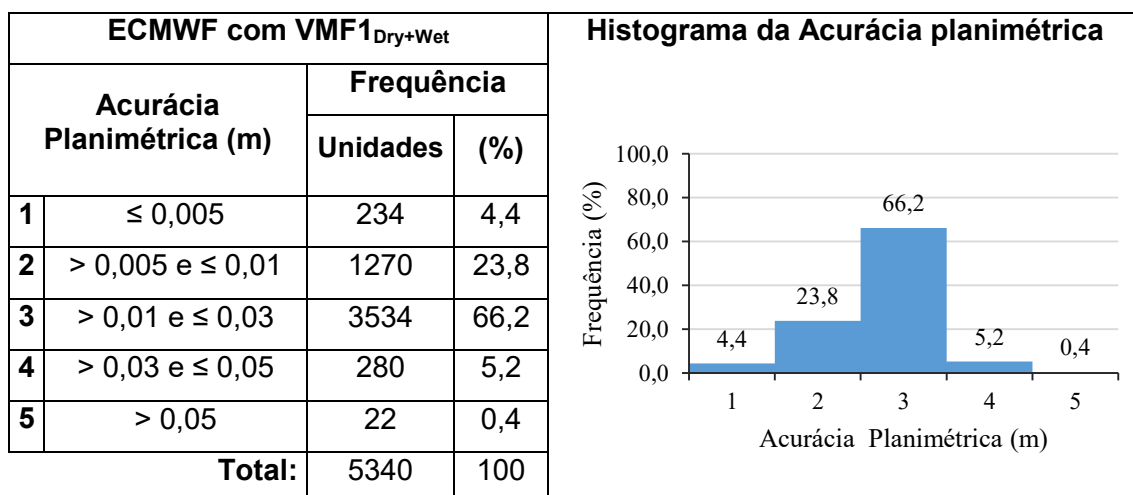


Figura 21 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 6.

Pode-se notar no histograma da Figura 21, que 94,4% da amostra apresentou acurácia inferior a 3cm. Além disso, nesta estratégia de

processamento 0,4% dos resultados atingiram valores superiores a 5cm (0,05m a 0,08).

A Figura 22 representa o histograma de frequências da acurácia da resultante planimétrica das coordenadas para o processamento 7. Neste processamento foi utilizado o modelo priori de Niell (Saastamoinen<sub>Dry</sub> associado a função de mapeamento NMF<sub>Dry</sub>). Já para a componente úmida foi utilizada a função de mapeamento NMF<sub>wet</sub>.

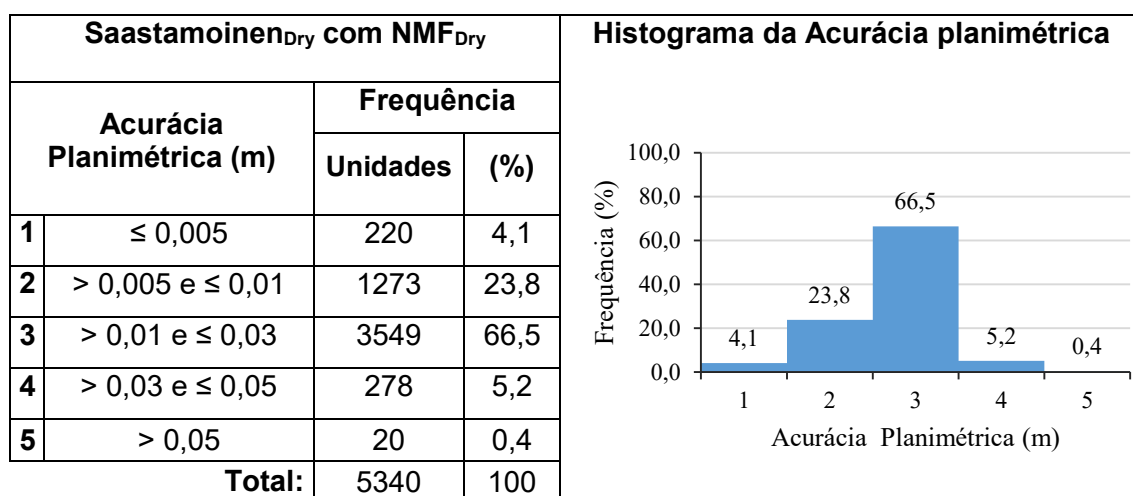


Figura 22 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 7.

Analisando a Figura 22, nota-se que 94,4% da amostra apresentaram valores inferiores de 3cm. Ademais, 0,4% dos resultados de acurácia planimétrica apresentaram valores superiores a 5cm (0,05m a 0,12m).

O histograma de frequências da Figura 23 refere-se acurácia planimétrica das coordenadas empregando o modelo a priori hidrostático GPT em conjunto com a função de mapeamento GMF<sub>Dry</sub>. A função mapeamento escolhida para a componente úmida do atraso troposférico foi GMF<sub>wet</sub>.

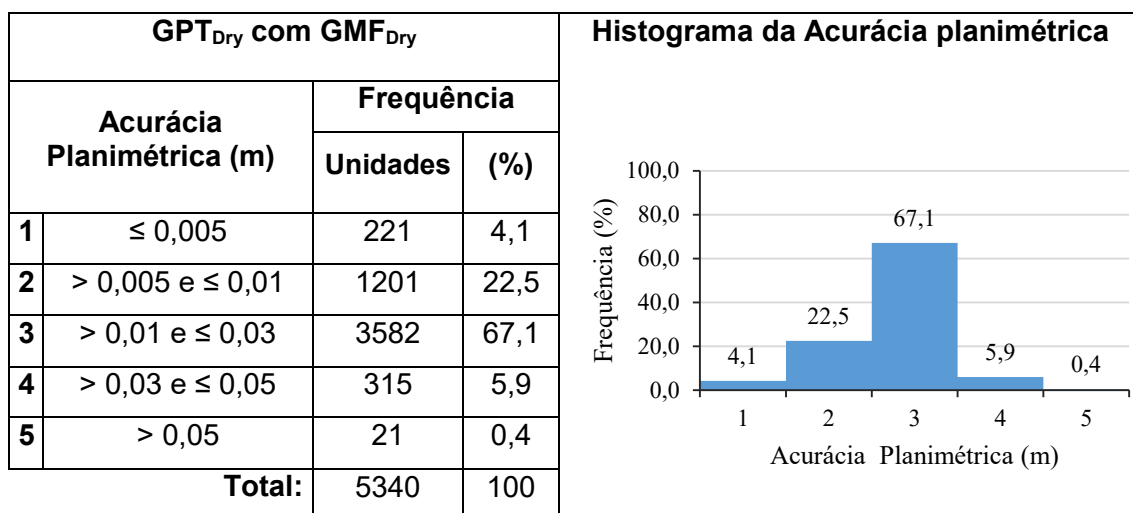


Figura 23 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 8.

Para a estratégia 8, 93,7% da amostra apresentou valores de acurácia planimétrica inferior a 3cm. No entanto, 0,4% da amostra apresentou valores superiores a 5cm (0,05m a 0,09m).

O histograma de frequências da Figura 24 representa amostra de acurácia planimétrica para a estratégia 9. O modelo a priori empregado para o cálculo da componente hidrostática foi modelo ECMWF<sub>Dry</sub> em conjunto com a função de mapeamento VMF1<sub>Dry</sub>. Para a componente úmida foi utilizada a função de mapeamento VMF1<sub>Wet</sub>.

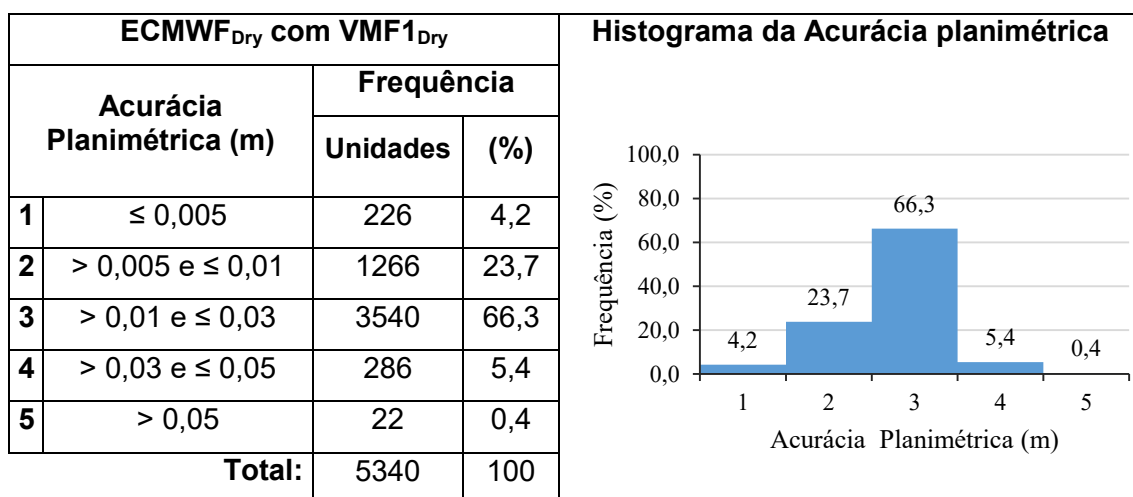


Figura 24 - Histograma da acurácia planimétrica para a estratégia 9.

Nota-se que 94,2% da amostra de acurácia planimétrica referente a estratégia 9 apresentaram valores inferiores a 3cm. No entanto, 0,4% das acurácias foram superiores a 5cm (0,05m a 0,09m).

A Figura 25 resume as porcentagens da amostra que obteve acurácia planimétrica inferior a 3cm e superior a 5cm, de acordo com cada modelo a priori empregado para componente hidrostática do atraso troposférico.

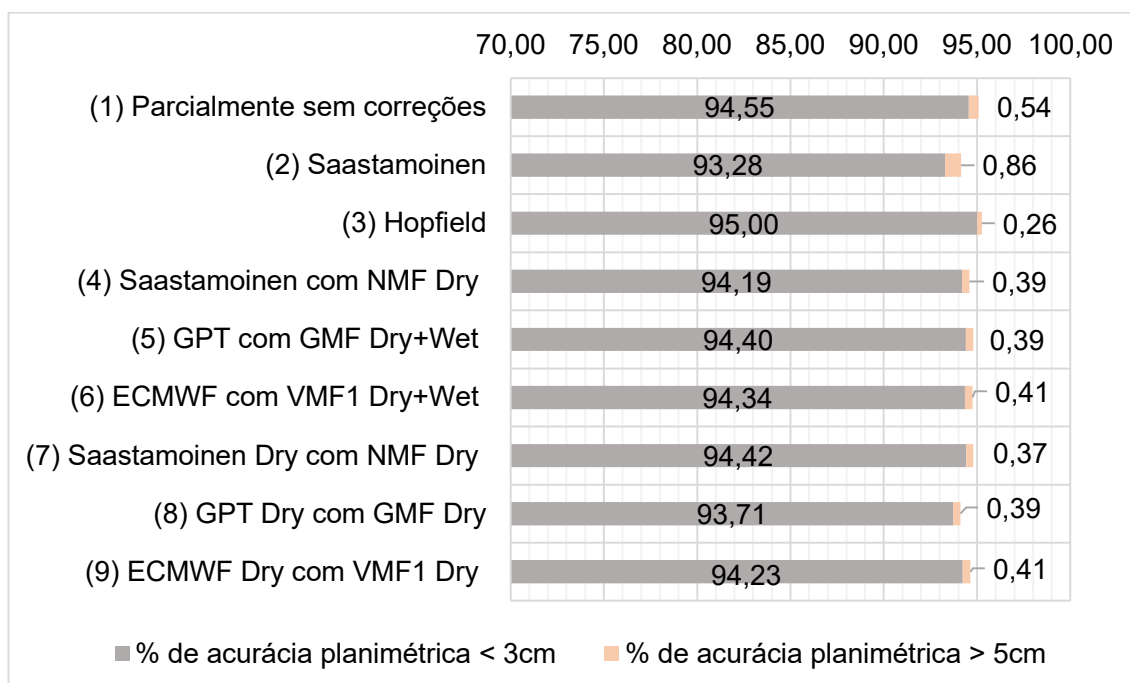


Figura 25 - Resumo do desempenho de cada modelo troposférico a priori em relação a acurácia planimétrica.

O processamento que utilizou um modelo a priori Saastamoinen (estratégia 2) apresentou a menor porcentagem de acurácias planimétricas inferiores a 3cm, aliado a maior porcentagem de valores superiores a 5cm.

Avaliando os 9 histogramas de frequências e a Figura 25, constata-se que em relação à planimetria, os processamentos apresentaram desempenho similares, até mesmo para estratégia em que não foi utilizado um modelo a priori para componente hidrostática. No entanto, o histograma da estratégia em que foi utilizado o modelo Hopfield para a componente hidrostática (Figura 22), obteve a maior porcentagem de acurácias planimétricas inferiores a 3cm, bem como a menor porcentagem de ocorrência de valores superiores a 5cm.

Os valores de RMS e mediana para cada amostra de acurácia planimétrica são apresentados na Tabela 8. Avaliando os resultados exibidos na mesma, constata-se que nenhuma amostra de acurácia planimétrica atingiu valores de RMS e mediana superiores a 2 centímetros.

Tabela 8 - Estatísticas descritivas da acurácia planimétrica por estratégia de processamento.

<b>Modelo troposférico a priori (modelo + função de mapeamento)</b>	<b>RMS</b>	<b>Mediana</b>
(1) Parcialmente sem correções	0,017	0,013
(2) Saastamoinen	0,019	0,015
(3) Hopfield	0,017	0,013
(4) Saastamoinen com NMF <sub>Dry</sub>	0,018	0,014
(5) GPT com GMF <sub>Dry+Wet</sub>	0,018	0,014
(6) ECMWF com VMF1 <sub>Dry+Wet</sub>	0,018	0,014
(7) Saastamoinen <sub>Dry</sub> com NMF <sub>Dry</sub>	0,018	0,014
(8) GPT <sub>Dry</sub> com GMF <sub>Dry</sub>	0,018	0,014
(9) ECMWF <sub>Dry</sub> com VMF1 <sub>Dry</sub>	0,018	0,014

Avaliando a Tabela 8, nota-se que a estratégia 2, em que foi utilizado o modelo a priori de Saastamoinen, obteve maior valor de RMS e mediana das amostras de acurácia posicional. Os menores valores de RMS e mediana foi alcançado pela amostra na qual foi utilizado o modelo troposférico a priori de Hopfield. As estratégias de 4 a 9 apresentaram os mesmos valores de estatísticas descritivas das amostras.

Em suma, os resultados apresentados na Tabela 8 reforçam que as estratégias de processamento apresentaram resultados similares de acurácia planimétrica, até mesmo na amostra em que não foi utilizado um modelo troposférico a priori.

### **6.1.2. Acurácia altimétrica**

A seguir são apresentados os histogramas de frequências das acurácias altimétricas para cada modelo de atraso troposférico.

A Figura 26 representa o histograma de frequências da acurácia altimétrica em que não foi utilizado um modelo a priori para a componente hidrostática do

atraso troposférico no processamento. Pode-se notar que 100% da amostra apresentou valor de acurácia superior a 5cm, chegando a atingir 49 centímetros.

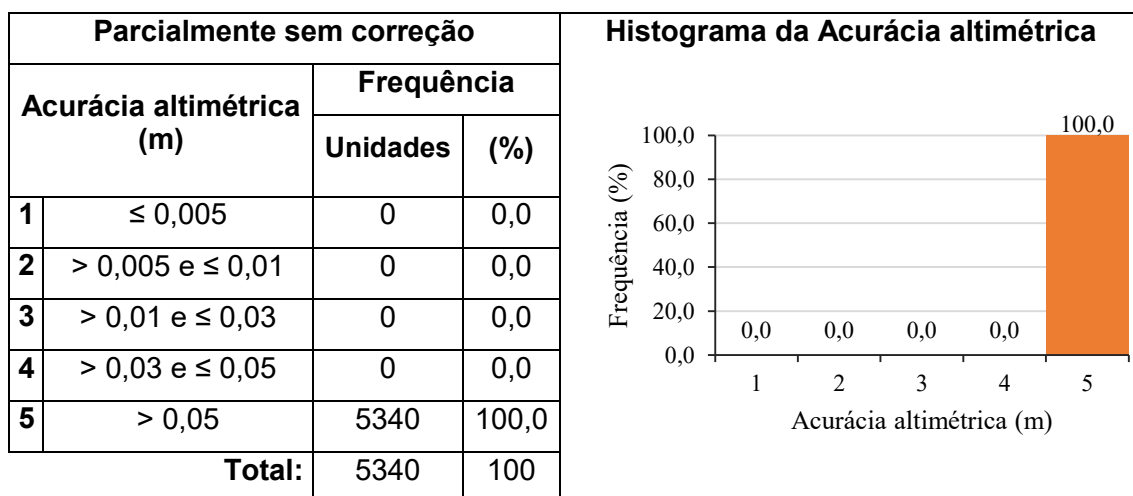


Figura 26 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 1.

A Figura 27 representa um novo histograma de frequências da acurácia altimétrica para a estratégia 1. Neste histograma, os intervalos das classes são diferentes dos demais, com objetivo de auxiliar na interpretação dos valores de acurácia altimétrica no PPP, quando não é utilizado um modelo a priori para correção da componente hidrostática.

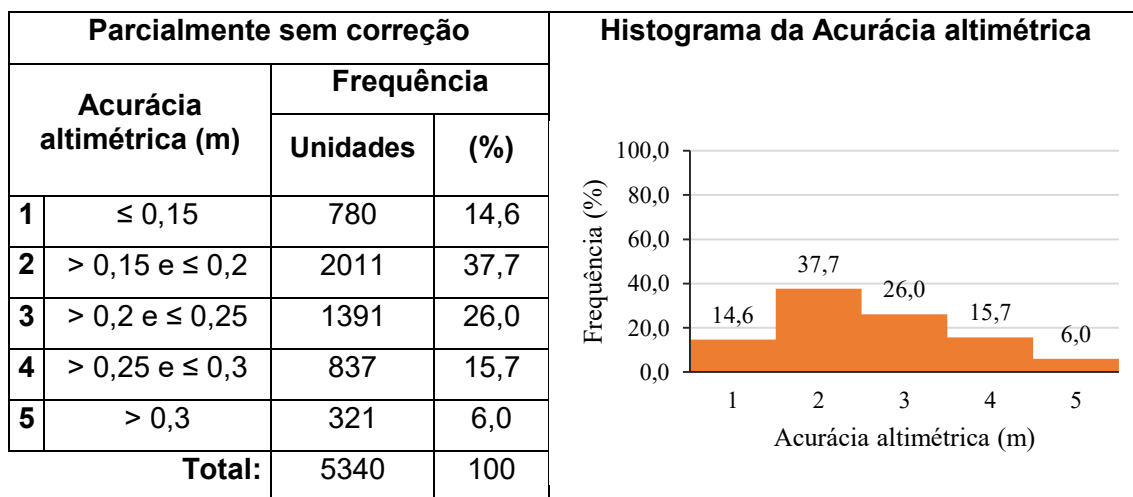


Figura 27- Novo histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 1.

Analisando o novo histograma (Figura 27), 85,4% da amostra de acurácia altimétrica foi superior a 15cm, e aproximadamente metade da amostra atingiu valores superiores a 20cm, evidenciando os efeitos significativos que a refração troposférica pode causar na componente altimétrica, ao contrário do que ocorre com a componente planimétrica.

O histograma de frequências da acurácia altimétrica para estratégia 2 é exibido na Figura 28. O modelo a priori utilizado foi o Saastamoinen para correção da componente hidrostática, e a função de mapeamento  $NMF_{wet}$  para a componente úmida estimada.

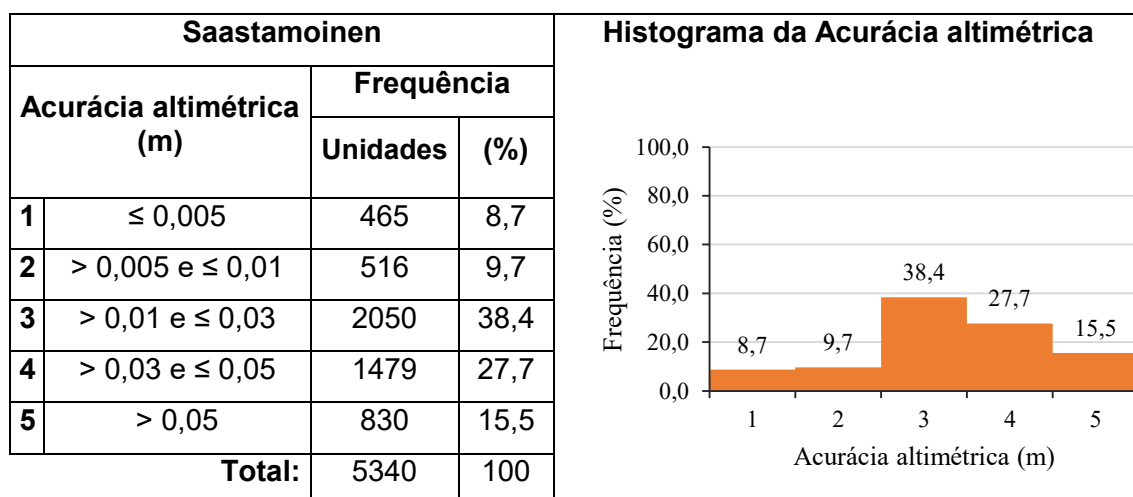


Figura 28 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 2.

Analisando a Figura 28 observa-se que 56,8% da amostra apresentou valores de acurácia inferiores a 3cm. No entanto, 15,5% dos resultados de acurácia foram superiores a 5cm (5cm a 27cm). A Figura 29 representa o histograma de frequências da acurácia altimétrica em que foi empregado o modelo a priori Hopfield, e a função de mapeamento Hopfield para a componente úmida estimada.

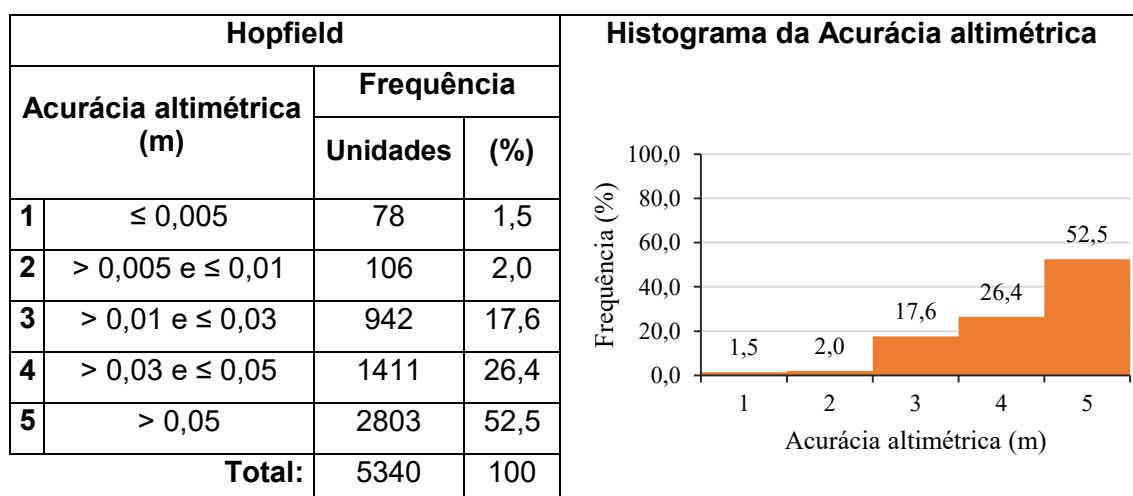


Figura 29 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 3.

Pode-se notar na Figura 29 que apenas 21,1% da amostra de acurácia altimétrica apresentou valores inferiores a 3cm, quando o modelo a priori

Hopfield é utilizado no processamento PPP. Além disso, 52,5% dos resultados foram superiores a 5cm, chegando a atingir 22 centímetros.

O histograma de frequências da Figura 30 representa a amostra de acurácia altimétrica em que foi empregado o modelo a priori de Niell (Saastamoinen em conjunto com a função de mapeamento  $NMF_{Dry}$ ). Já para a componente úmida foi utilizado a função de mapeamento  $NMF_{Wet}$ .

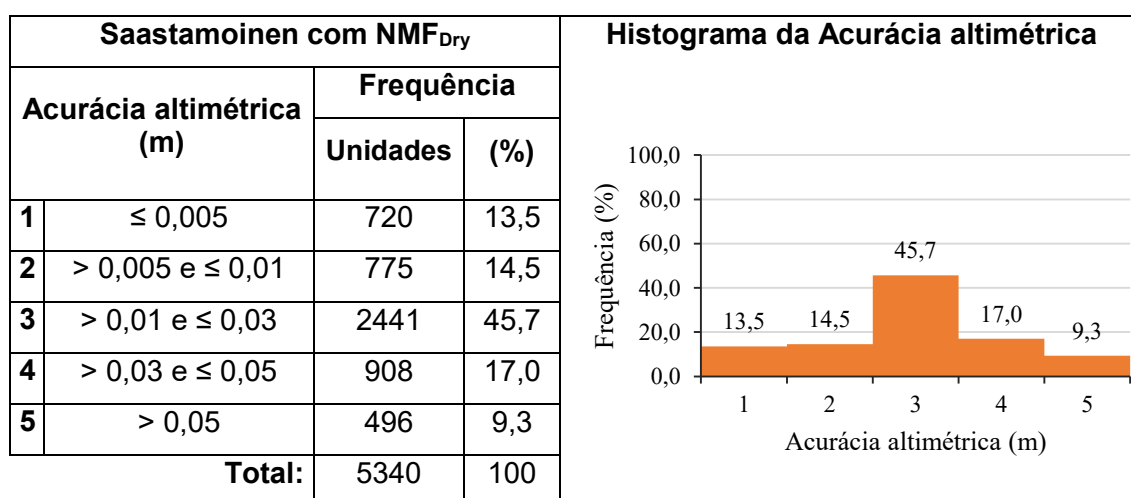


Figura 30 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 4.

Verifica-se na Figura 30 que 73,7% da amostra apresentou acurácia altimétrica inferior a 3cm, e somente 9,3% dos valores foram superiores a 5cm (0,05m a 0,15m).

A Figura 31 representa o histograma de frequências da acurácia altimétrica para a estratégia 5. O modelo priori utilizado foi o GPT, e as funções de mapeamento empregadas foram:  $GMF_{Dry+Wet}$  para o modelo troposférico a priori, e  $GMF_{Wet}$  para componente úmida estimada.

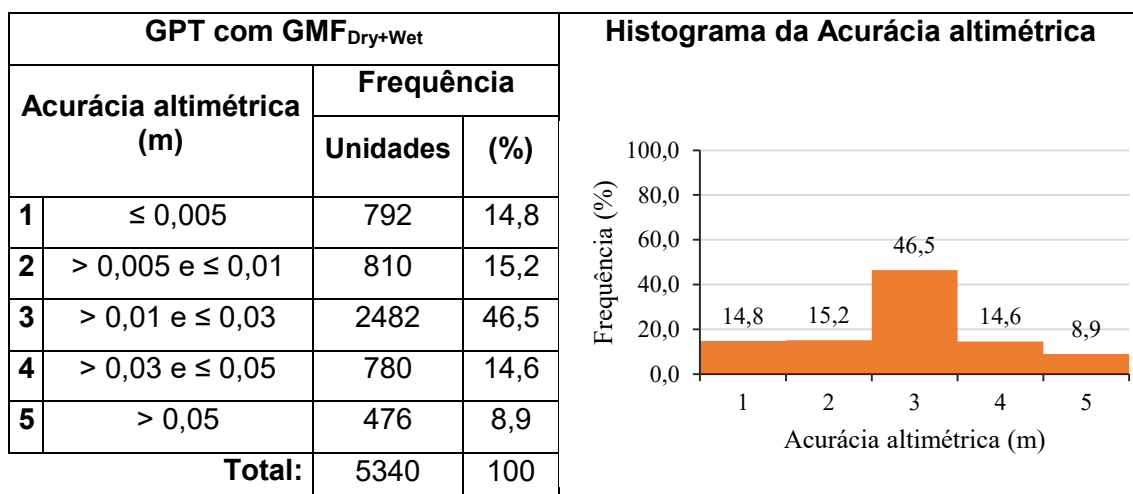


Figura 31 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 5.

Analisando a Figura 31, nota-se que 76,5% dos valores de acurácia altimétrica apresentaram valores inferiores a 3cm. E apenas 8,9% da amostra obteve resultados de acurácia superiores a 5cm (0,05m a 0,16m).

O histograma de frequências da acurácia altimétrica apresentado na Figura 32 representa os resultados obtidos no processamento com o modelo a priori ECMWF. As funções de mapeamento utilizadas foram VMF1<sub>Dry+Wet</sub>, para o modelo troposférico a priori, e VMF1<sub>Wet</sub>, para a componente úmida.

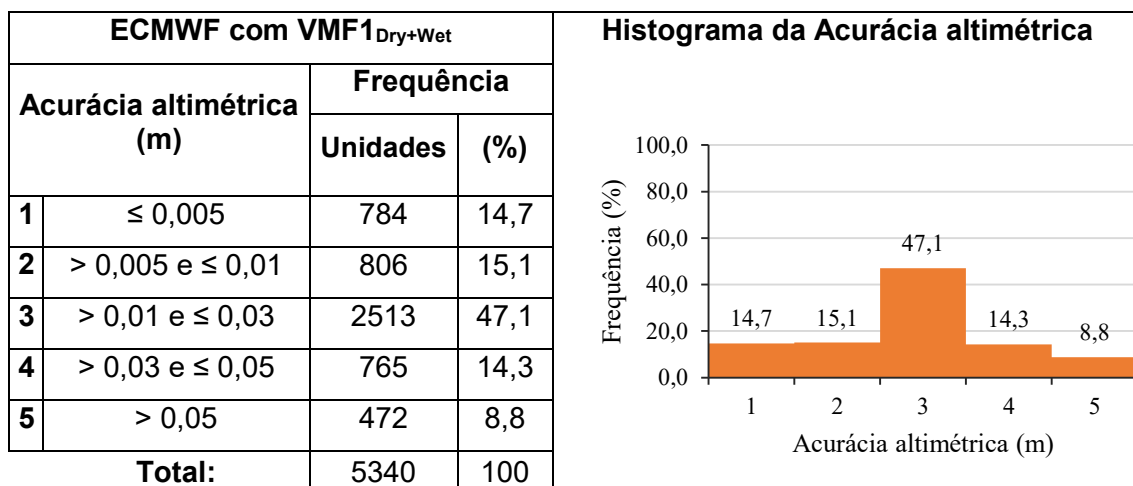


Figura 32 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 6.

Verifica-se que 76,9% da amostra do histograma da Figura 32 obteve acurácia altimétrica inferior a 3cm, e apenas 8,8% da amostra apresentou valores superiores a 5cm (0,05m a 0,16m).

A Figura 33 representa o histograma de frequências da acurácia altimétrica para o processamento em que foi utilizado o modelo a priori de Niell

(Saastamoinen<sub>Dry</sub> em conjunto com a função de mapeamento NMF<sub>Dry</sub>), e a função de mapeamento NMF<sub>wet</sub>, para a componente úmida.

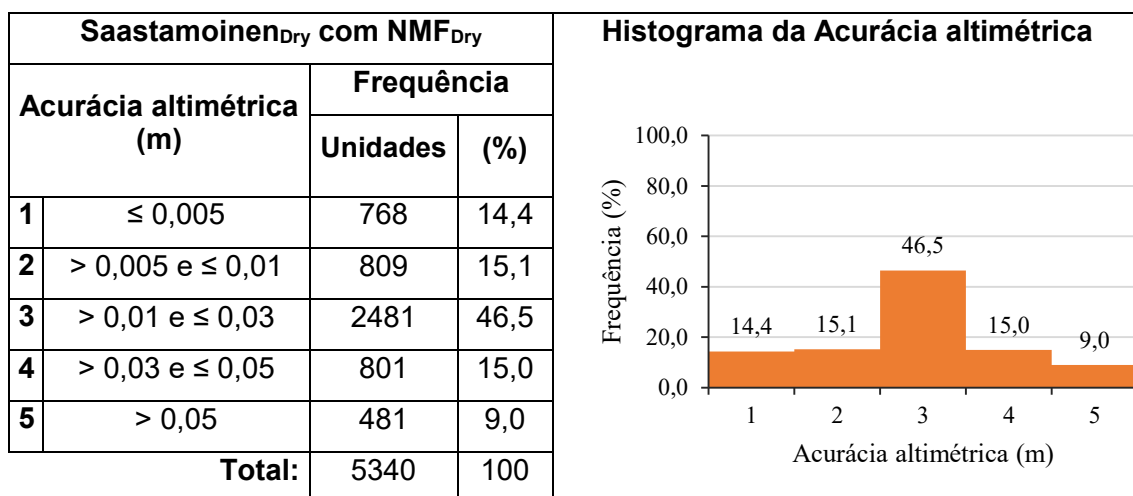


Figura 33 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 7.

Avaliando a Figura 33 pode-se notar que 76% da amostra de acurácia altimétrica apresentou valores inferiores a 3cm. Já para os valores superiores a 5cm a amostra obteve uma porcentagem de 9% (0,05m a 0,16m).

O histograma de frequências da Figura 34 representa a acurácia altimétricas da estratégia 8 de processamento. O modelo a priori utilizado foi GPT<sub>Dry</sub>, e a função de mapeamento GMF<sub>Dry</sub> para componente hidrostática, e GMF<sub>wet</sub> para componente úmida.

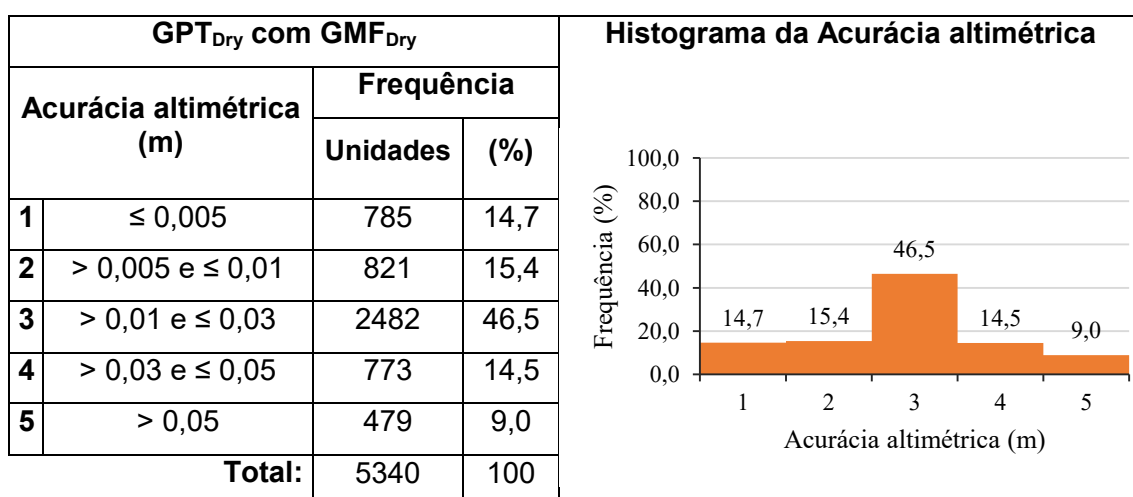


Figura 34 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 8.

Analisando a Figura 34, 76,6% dos valores do histograma de frequências foram menores que 3cm, e 9% da amostra obteve acurácia altimétrica superior a 5cm (0,05m a 0,16m).

O histograma de frequência da acurácia altimétricas (Figura 35) representa o processamento em que foi utilizado o modelo a priori ECMWF<sub>Dry</sub> em conjunto com a função de mapeamento VMF1<sub>Dry</sub>. Para a componente úmida foi utilizado a função de mapeamento VMF1<sub>Wet</sub>.

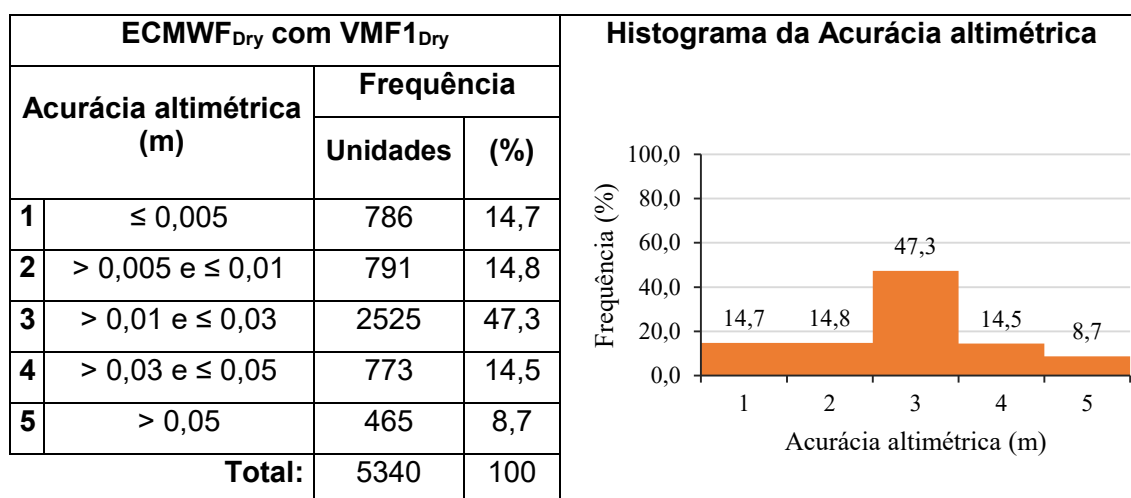


Figura 35 - Histograma da acurácia altimétrica para a estratégia 9.

Avaliando a Figura 35, pode-se verificar que 76,8% dos valores do histograma são menores que 3cm. Além disso apenas 8,7% da amostra apresentou valores superiores a 5cm (0,05m a 0,16m).

Da mesma maneira, como realizado para a acurácia da resultante planimétrica, a Figura 36 resume as porcentagens da amostra que obteve acurácia altimétrica inferior a 3cm e superior a 5cm, de acordo com cada modelo a priori de refração troposférica.

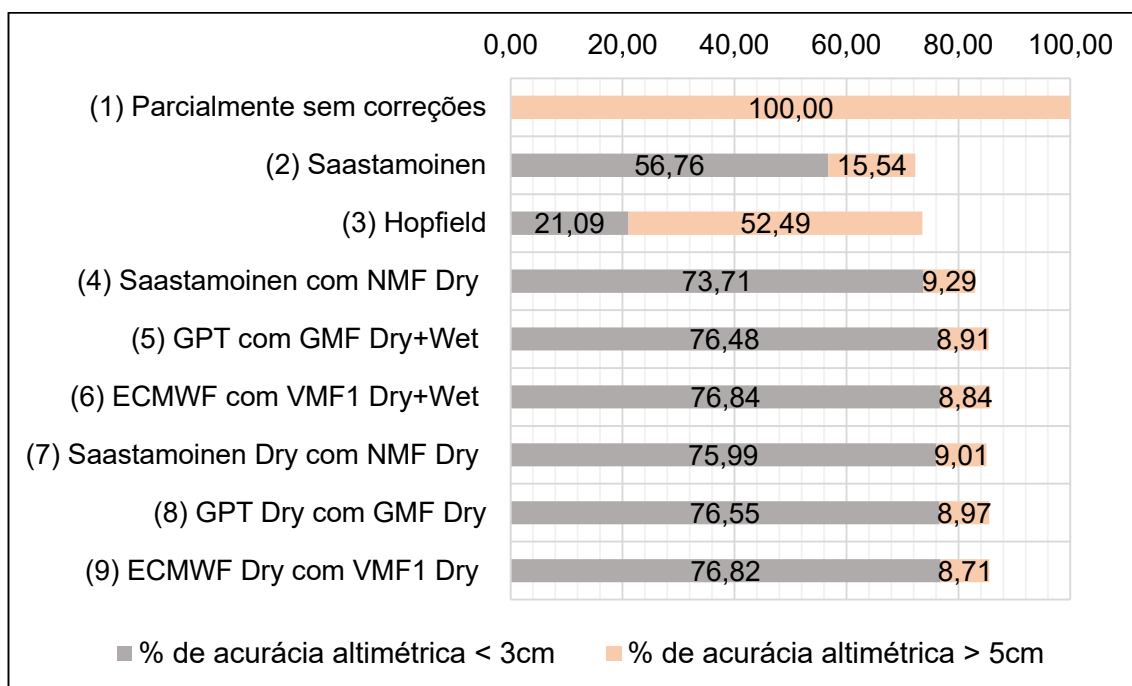


Figura 36 - Resumo do desempenho de cada modelo troposférico a priori em relação a acurácia altimétrica.

Analisando os nove histogramas de frequências referentes a acurácia altimétrica e a Figura 36, observa-se uma maior porcentagem de valores superiores a 3cm se comparados aos histogramas de frequências da resultante planimétrica. Para o histograma referente ao processamento sem a utilização do modelo a priori (Figura 26 e 27), 100% das acurácias altimétricas atingiram valores superiores a 5cm (entre 7cm a 49 cm).

Entre os histogramas de frequências dos processamentos restantes, o referente ao modelo a priori Hopfield em conjunto com a função de mapeamento de Hopfield (Figura 29) apresentou a maior porcentagem de acurácias altimétricas superiores a 5cm (52,49%), seguido do histograma do processamento com o modelo a priori Saastamoinen (estratégia 2), com uma porcentagem de 15,54.

O melhor desempenho entre as estratégias utilizadas, na acurácia altimétrica, foi obtido com modelo a priori ECMWF associado com a função de mapeamento VMF1<sub>Dry+Wet</sub>. Além disso, comparando essa estratégia, com a estratégia 9, que empregou o modelo priori ECMWF<sub>Dry</sub> com apenas coeficientes hidrostáticos da função de mapeamento de Vienna - VMF1<sub>Dry</sub>, os resultados foram análogos. O mesmo ocorre com a estratégia 5 (GPT com GMF<sub>Dry+Wet</sub>) e a

estratégia 8 ( $GPT_{Dry}$  com  $GMF_{Dry}$ ). Já em relação ao processamento 4 (Saastamoinen com  $NMF_{Dry}$ ), o mesmo apresentou uma porcentagem menor da amostra de acurácia altimétrica inferior a 3cm se comparado a estratégia de processamento 7 (apenas o modelo hidrostático de Saastamoinen com  $NMF_{Dry}$ ).

As amostras de acurácias altimétricas apresentaram os melhores resultados nas estratégias 5, 6, 7, 8 e 9, em que foram utilizados os modelos a priori Saastamoinen, GPT e ECMWF, associados as funções de mapeamento Niell, GMF e VMF1, respectivamente.

Na Tabela 9 estão os resultados das estatísticas descritivas obtidas para cada amostra de acurácia altimétrica.

Tabela 9 - Estatísticas descritivas da acurácia altimétrica por estratégia de processamento

<b>Modelo troposférico a priori (modelo + função de mapeamento)</b>	<b>RMS</b>	<b>Mediana</b>
(1) Parcialmente sem correções	0,215	0,196
(2) Saastamoinen	0,042	0,027
(3) Hopfield	0,069	0,052
(4) Saastamoinen com $NMF_{Dry}$	0,035	0,018
(5) GPT com $GMF_{Dry+Wet}$	0,036	0,017
(6) ECMWF com $VMF1_{Dry+Wet}$	0,035	0,017
(7) Saastamoinen <sub>Dry</sub> com $NMF_{Dry}$	0,036	0,017
(8) $GPT_{Dry}$ com $GMF_{Dry}$	0,036	0,017
(9) $ECMWF_{Dry}$ com $VMF1_{Dry}$	0,035	0,017

Avaliando os valores de RMS e mediana da Tabela 9, houve uma maior amplitude dos dados (0,035 a 0,215m) se comparado com os valores obtidos com as amostras de acurácia planimétrica (0,013 a 0,019m).

A estratégia 1, na qual não foi utilizada um modelo troposférico a priori, obteve um valor de RMS de 0,215m e mediana de 0,196m, resultados bem superiores se comparado aos demais. Já as amostras de acurácia altimétrica referentes as estratégias 4 a 9 apresentaram valores destas estatísticas descritivas bem similares.

Em relação a estratégia 3, em que foi usado o modelo Hopfield, o RMS e a mediana da amostra de acurácia altimétrica foram maiores se comparado as estratégias 4 a 9, as quais apresentaram valores menores e análogos. O modelo Saastamoinen (estratégia 2) também apresentou valores destas estatísticas maiores.

Em suma, os resultados apresentados na Tabela 9 indicam que atraso troposférico residual afeta a acurácia da componente altimétrica. Dentre as estratégias para mitigação do atraso troposférico investigadas, o modelo de Niell, GPT/GMF e ECWMF/VMFI apresentaram os melhores desempenhos em relação a acurácia altimétrica no PPP.

## **6.2. Avaliação do comportamento da acurácia altimétrica por estação do ano e região geográfica.**

Como mencionado anteriormente, o atraso troposférico está fortemente correlacionado com altura estimada, afetando assim predominantemente a acurácia da componente altimétrica. Portanto, optou-se por avaliar apenas comportamento da acurácia altimétrica por estação do ano e região geográfica, visto que, atraso troposférico afeta diretamente a estimativa dos parâmetros de altura (DACH et al., 2015).

No intuito de verificar a ordem dessa grandeza ao longo do ano, foram calculadas os RMSs da acurácia altimétrica referente aos 15 dias de processamento nos períodos do verão, outono, inverno e primavera, em cada modelo a priori utilizado neste estudo. Além disso, estes valores de RMS foram divididos por região geográfica do Brasil.

A Figura 37 representa os RMSs da acurácia altimétrica, em metros, por período e região de processamento, referente a estratégia em que não foi utilizado o modelo a priori para a componente hidrostática.

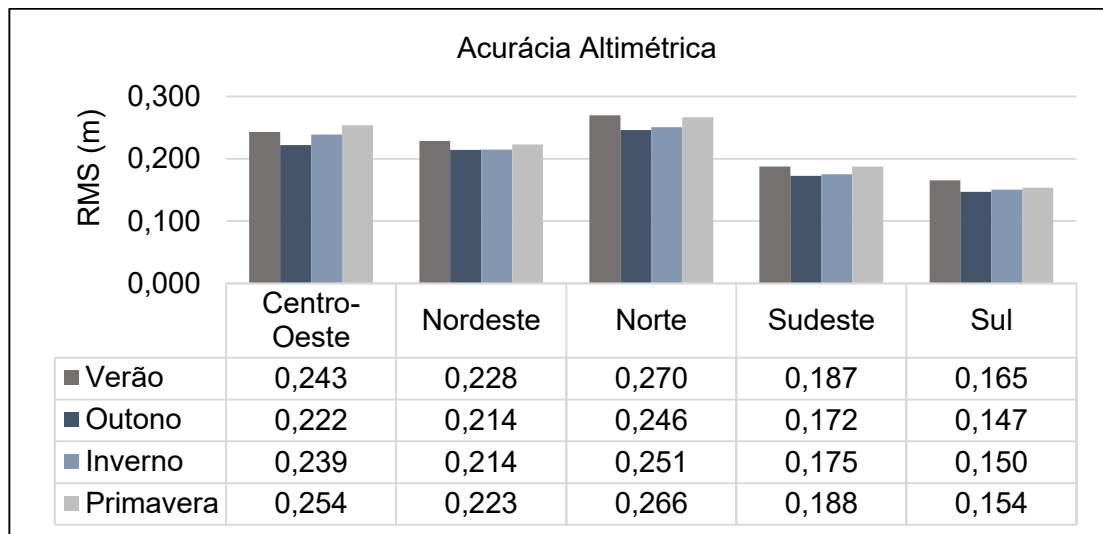


Figura 37- RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 1.

Como nesta estratégia de processamento não foi utilizado um modelo a priori para correção do atraso troposférico, os valores de RMS atingiram valores aproximadamente entre 15 a 27cm. Nota-se que os valores de RMS para as estações GNSS localizadas na região Norte foram superiores as demais regiões geográficas. Já as estações GNSS localizadas na região Sul apresentaram os menores valores de RMS, em todas as estações do ano. Além disso, para todas as regiões geográficas, os maiores valores de RMS foram obtidos no verão e primavera.

Os RMSs para a estratégia 2, em que foi utilizado o modelo a priori Saastamoinen para ZHD, e a função de mapeamento de Niell (NMF<sub>wet</sub>) para a componente úmida estimada, estão representados na Figura 38.

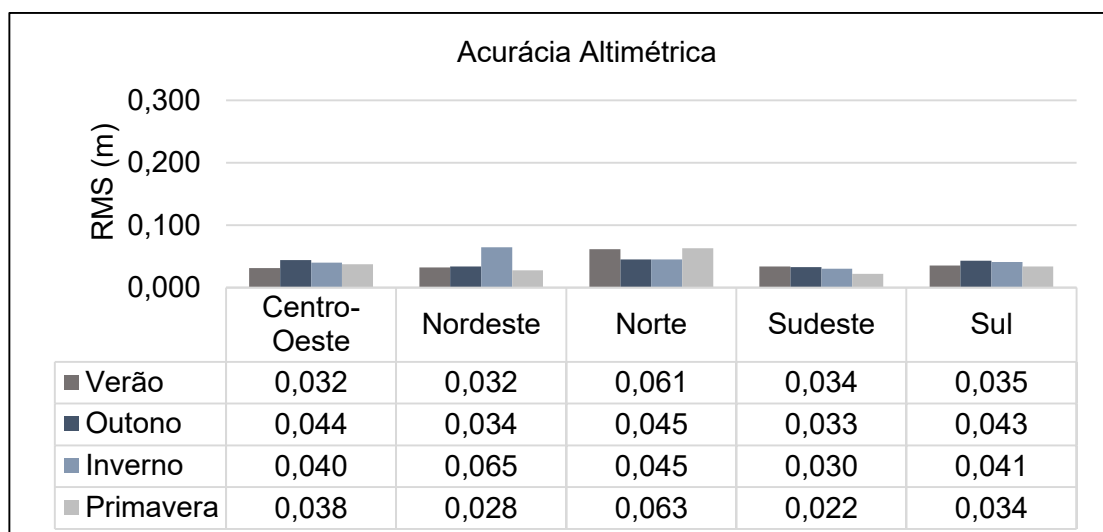


Figura 38 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 2.

Analisando a Figura 38, as estações GNSS localizadas na região Norte também apresentaram os maiores valores de RMS da acurácia altimétrica no verão, outono e primavera (4 a 6cm). Nota-se que para este processamento os valores de RMS foram maiores no inverno e outono para regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sul. Já as regiões Norte e Sudeste apresentaram os maiores valores na primavera e no verão, respectivamente.

A Figura 39 representa os RMSs da acurácia altimétrica, por estação do ano e região geográfica, para o processamento 3, em que foi empregado o modelo a priori de Hopfield.

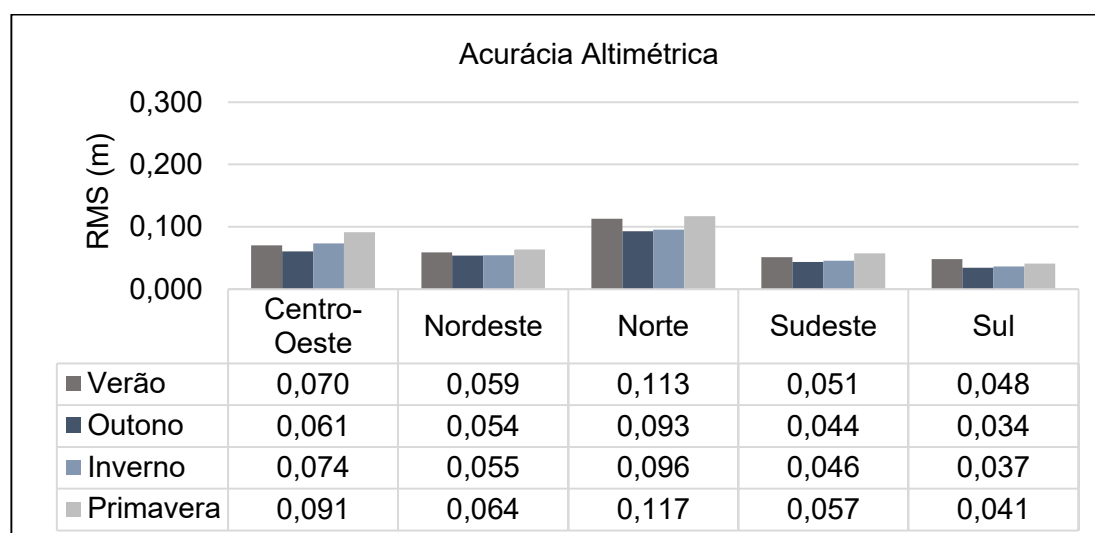


Figura 39 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 3.

Nota-se na Figura 39, que os RMSs da acurácia altimétrica das estações GNSS localizadas na região Norte foram maiores, e os da região Sul menores. Além disso, para todas as regiões geográficas, os valores de RMS foram menores no outono, e maiores na primavera, exceto para região Sul, que apresentou o maior valor de RMS no verão.

A Figura 40 representa os valores de RMS da acurácia altimétrica para o processamento em que foi utilizado o modelo a priori de Niell (Saastamoinen com  $NMF_{Dry}$ ).

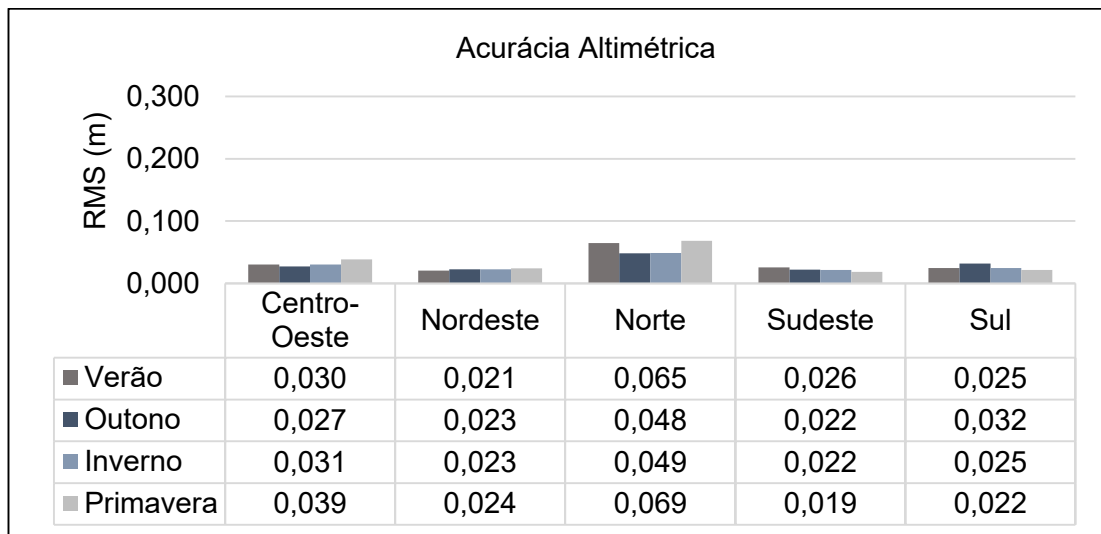


Figura 40 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 4.

Analisando a Figura 40, observa-se que novamente as estações GNSS da região Norte apresentaram os maiores RMS, em todas as estações do ano. Para as estações localizadas nas regiões Centro-Oeste, Nordeste, e Norte, os maiores valores de RMS da acurácia altimétrica foram na primavera. Já na região Sudeste o RMS foi maior no verão, e menor na primavera. As estações localizadas na região Sul apresentaram menor RMS na primavera e maior no outono.

Os RMSs da acurácia altimétrica por estação do ano e região geográfica para estratégia de processamento 5 estão representados na Figura 41. O modelo a priori utilizado foi o GPT com GMF<sub>Dry+Wet</sub>.

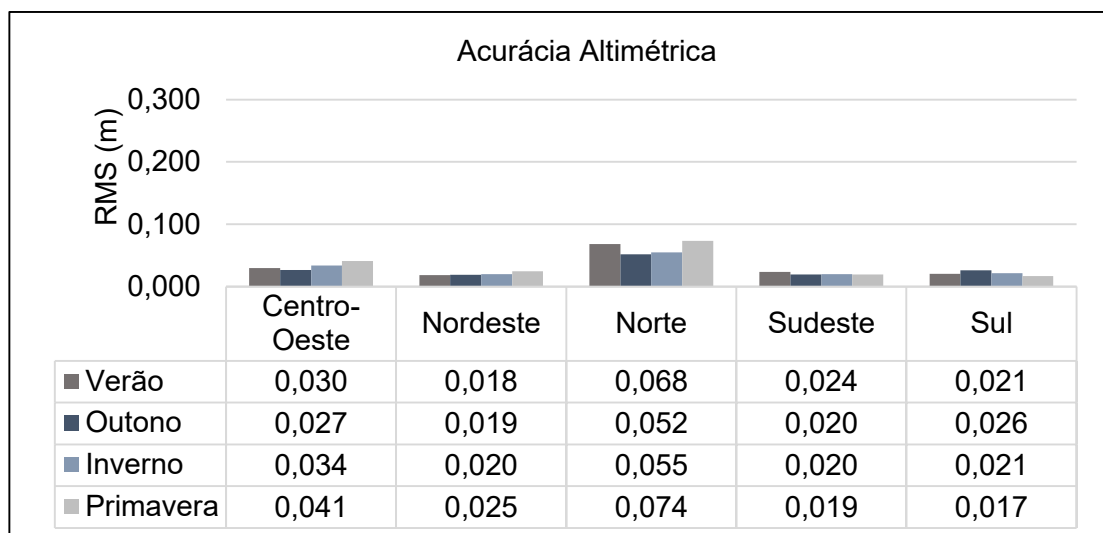


Figura 41 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 5.

Observando a Figura 41, novamente as estações GNSS localizadas na região Norte apresentaram os maiores valores de RMS em todos períodos analisados. Nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte os maiores valores de RMS da acurácia altimétrica ocorreu na primavera. Já as regiões Sudeste e Sul, apresentaram comportamento contrário, e os menores valores foram obtidos na primavera.

A Figura 42 refere-se aos RMSs da acurácia altimétrica, para o processamento com o modelo a priori ECMWF + VMF1<sub>Dry+Wet</sub>. A região Norte se destaca na Figura 42, com os maiores valores de RMS para todas as estações do ano. O menor valor de RMS foi apresentado na região Sul no período da primavera.

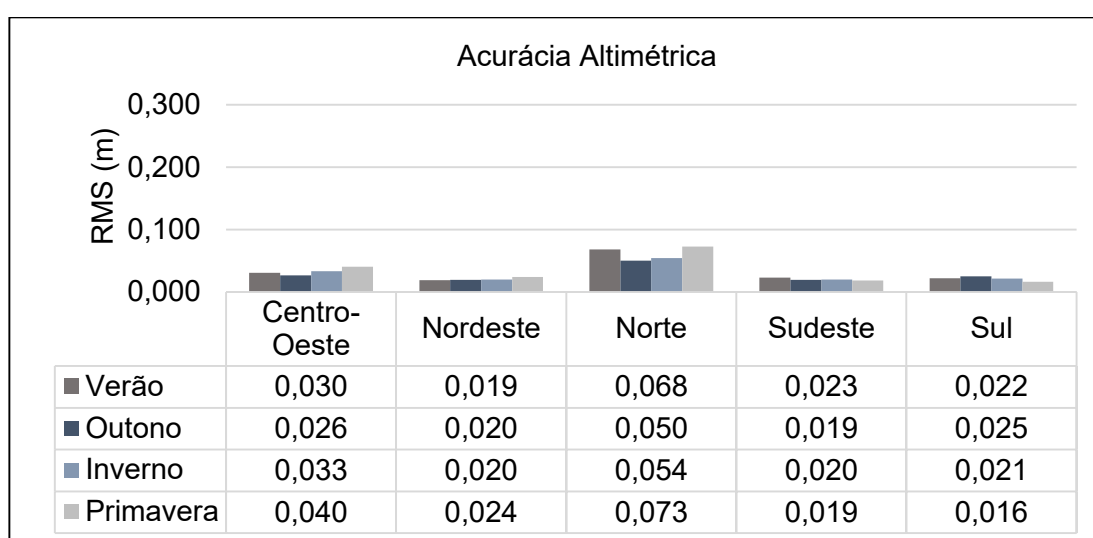


Figura 42 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 6.

A Figura 43 representa os RMSs da acurácia altimétrica por região e estação do ano em que foi utilizado o modelo a priori de Niell (Saastamoinen<sub>Dry</sub> com NMF<sub>Dry</sub> para a componente hidrostática do atraso troposférico).

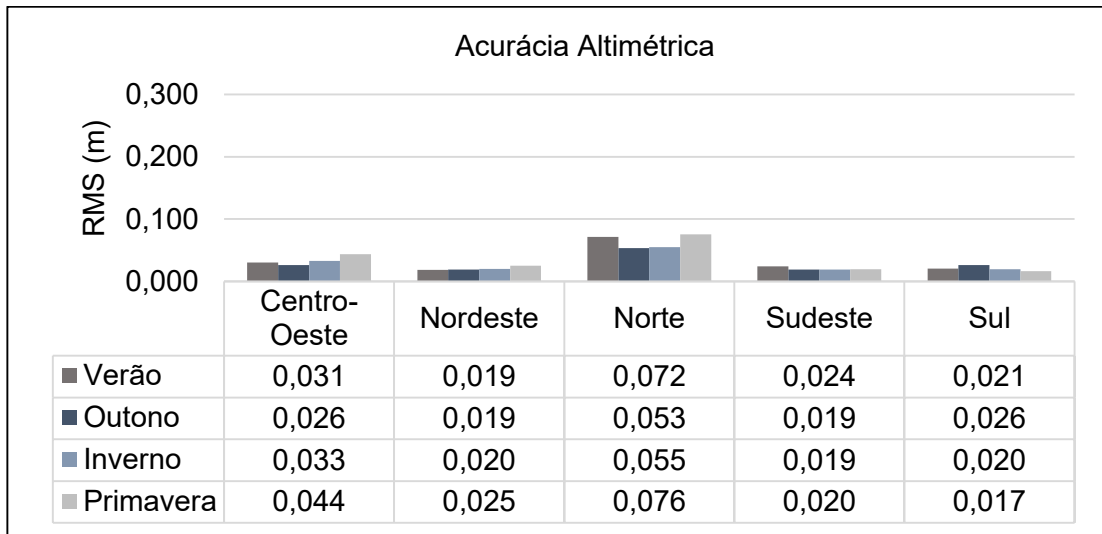


Figura 43 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 7.

Analisando a Figura 43, as regiões Centro-Oeste, Norte, apresentaram os menores RMSs no outono. A região Nordeste obteve o menor valor de RMS no verão e outono, e a região Sudeste apresentou o menor valor de RMS no outono e inverno. Já para a região Sul, o menor RMS foi obtido na primavera. Novamente os maiores valores de RMS foram obtidos na região Norte.

Os RMSs da acurácia altimétrica da Figura 44 representa o processamento com modelo priori  $GPT_{Dry}$  com  $GMF_{Dry}$  para a componente hidrostática do atraso troposférico.

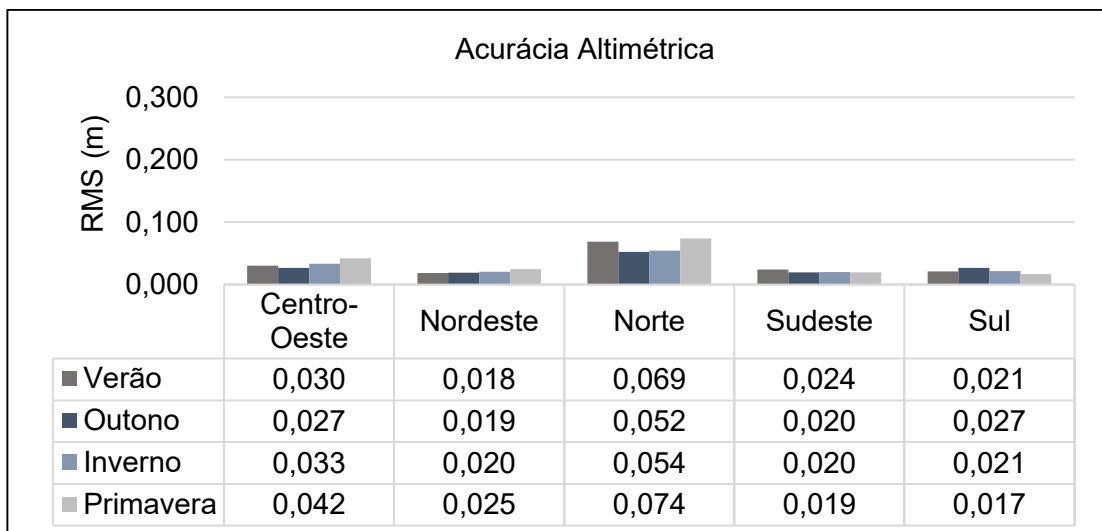


Figura 44 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 8.

A Figura 45 apresenta os RMSs da acurácia altimétrica por estação do ano e região geográfica, para o modelo a priori  $ECMWF_{Dry}$  com  $VMF1_{Dry}$ .

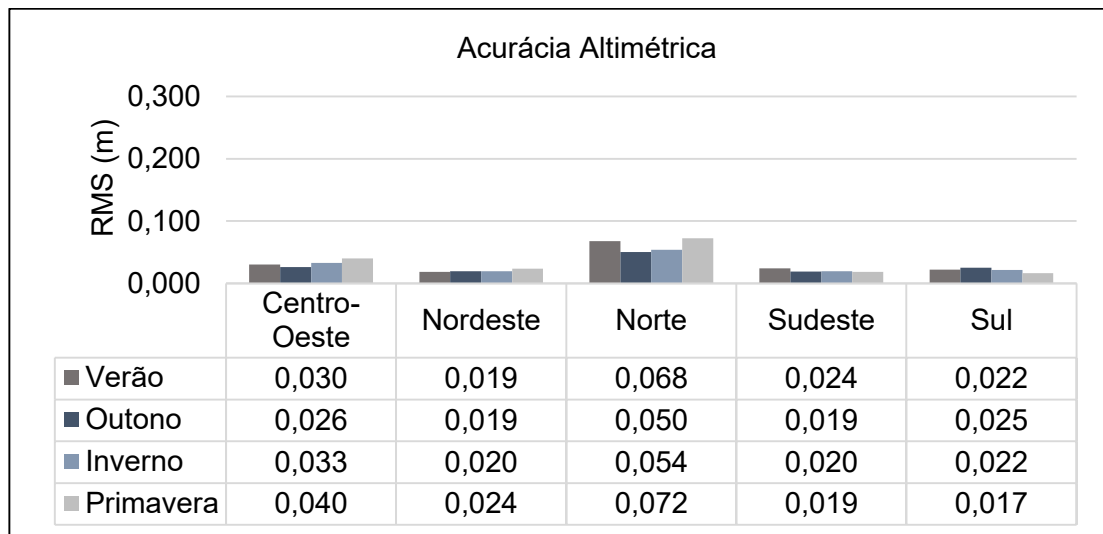


Figura 45 - RMS da acurácia altimétrica para a estratégia 9.

Analisando as Figuras 44 e 45, em ambas a região Norte apresenta os maiores RMSs em todos os períodos em análise. Além disso, nas duas estratégias as regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte, apresentaram os RMSs da acurácia altimétrica superiores na primavera. Já a região Sudeste e Sul alcançaram os menores RMSs na primavera.

As estratégias 5, 6, 7, 8 e 9 (Figuras 41 a 45) apresentaram valores de RMS análogos em todas as regiões geográficas e estações do ano. Nestes métodos, as regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte, apresentaram maiores RMSs referentes a acurácia altimétrica na primavera, e menores no outono. Já as estações GNSS localizadas no Sudeste e Sul, obtiveram os menores RMSs na primavera, e intercalaram os maiores resultados no inverno e outono.

Nota-se que a região Norte apresentou valores de RMS maiores para todas estratégias de processamento, acima dos resultados verificados para as demais regiões. Como Norte apresenta altos índices de umidade, já era esperado uma maior influência do atraso troposférico na posição das estações situadas nessa região. Além da elevada taxa de umidade na Amazônia, o clima equatorial úmido possui características de altas temperaturas e baixa amplitude térmica anual.

Por outro lado, não é descartado a influência de outros fatores nestes resultados anômalos, tais como, a presença de *outliers* ou o efeito da carga hidrológica em algumas estações GNSS próximas ao Rio Amazonas. Salienta-se que esse fenômeno não foi considerado no PPP executados neste estudo, e

como destacado por Bevis et al. (2005, *apud* NASCIMENTO, 2016) as estações localizadas na região amazônica experimentam maiores alterações em suas coordenadas verticais devido ao ciclo hidrológico intenso.

A região Sul apresenta uma homogeneidade em relação ao regime de chuvas ao longo do ano, temperaturas amenas e uma maior amplitude térmica anual, já o interior da região Nordeste possui um clima semiárido, com temperaturas elevadas, baixa umidade, e chuvas escassas e irregulares. A região Centro-Oeste apresenta temperaturas elevadas, e duas estações definidas, a chuvosa (outubro a março) e a seca (abril a setembro), com exceção ao norte do estado do Mato Grosso que tem o clima equatorial da Amazônia. O Sudeste apresenta temperaturas amenas, e o período chuvoso ocorre no período de outubro a março, no entanto há uma diversidade no clima dessa região conforme a altitude e pressão atmosférica (JESUS, 2017). Devido essa heterogeneidade climática, além de outros fatores como a topografia, as coordenadas das estações GNSS em território brasileiro experimentam diferentes influências do atraso troposférico.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

O objetivo principal do trabalho, que consiste no estudo dos efeitos da refração troposférica no PPP, foi alcançado por meio de estudos que permitem verificar e quantificar a acurácia das coordenadas estimadas, conforme cada modelo e função de mapeamento experimentado para a estimativa do atraso troposférico. Desta forma, foi utilizado a versão avançada do PPP disponível no BERNESE v.5.2, que é um software científico reconhecido por fornecer um alto padrão de qualidade no pós-processamento de dados GPS/GLONASS.

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as observáveis GNSS, e ao método de Posicionamento por Ponto Preciso, além dos fatores que degradam sua acurácia. Além disso, uma descrição a respeito dos sistemas de referência geodésicos modernos, e os conceitos ligados às etapas do processo de

transformação de referenciais e atualização de coordenadas, também foi apresentada.

Na seção 4.2 foi apresentado de maneira concisa os efeitos da troposfera na propagação dos sinais GNSS, e posteriormente o cálculo ou predição do atraso zenital troposférico com bases em modelos, funções de mapeamento, estimativa da componente úmida (ZWD), e dos gradientes horizontais no processamento de dados GNSS.

Os experimentos foram realizados para 89 estações da RBMC distribuídas nas cinco regiões geográficas do Brasil, no intervalo de 15 dias no verão, outono, inverno e primavera de 2016. Além do mais, houve padronização dos demais parâmetros de processamento nas estratégias avaliadas, de modo que as comparações pudessem ser efetuadas.

Foram analisadas nove estratégias de processamento para modelagem do atraso troposférico no PPP. Em relação a resultante planimétrica das coordenadas, o desempenho dos modelos para refração troposférica na acurácia das coordenadas foram bem similares, se comparado com componente altimétrica. Até mesmo no processamento em que não foi utilizado um modelo troposférico a priori. Isso comprova que os efeitos da troposfera não são significativos na planimetria.

No entanto, a estratégia 2 em que foi utilizado o modelo Saastamoinen para ZHD com a função de mapeamento úmida de Niell para ZWD, obteve a menor porcentagem de frequências de acurácia planimétrica inferior a 3cm (93,28%) e a maior porcentagem da amostra com acurácia superior a 5cm (0,86%). Para a resultante planimétrica, o melhor resultado foi obtido no histograma de frequências em que foi utilizado o modelo Hopfield para componente hidrostática e a função de mapeamento Hopfield para a componente úmida estimada.

Já em relação à componente altimétrica, a estratégia em que não foi utilizado um modelo troposférico a priori, mas apenas ZWD foi estimado, os valores de acurácia ficaram em torno de 7cm a 49cm, bem superiores em relação aos outros processamentos. Neste caso, constata que o atraso troposférico afeta consideravelmente a acurácia da altura estimada das estações GNSS, caso não seja corrigido no processamento dos dados, considerando a metodologia PPP.

O modelo Hopfield apesar de ter apresentado um resultado semelhante as outras estratégias em relação a acurácia da resultante planimétrica, não obteve o mesmo êxito em relação à acurácia altimétrica, em que 52,49% da amostra apresentou acurácia altimétrica superior a 5cm. Este resultado inferior na componente altimétrica, também foi encontrado no estudo realizado por Dodo et al. (2010), que avaliaram modelos troposféricos em uma rede regional GNSS na África utilizando o BSW. Neste trabalho, o RMS da componente altimétrica foi de 5cm em todas as estações analisadas, quando utilizado o modelo de Hopfield no processamento.

O processamento referente ao modelo Saastamoinen para ZHD e função de mapeamento úmida de Niell para ZWD (estratégia 2), também apresentou um desempenho inferior comparado as estratégias restantes, com apenas 56,76% das frequências da acurácia altimétricas menor que 3cm. Como mencionado anteriormente, os modelos de Hopfield e Saastamoinen são empíricos, e foram obtidos com base em observações meteorológicas coletadas predominantemente no hemisfério norte.

O melhor método de processamento em relação a componente altimétrica, foi obtida empregando a função de mapeamento de Vienna - VMF1 (*dry* e *wet*) de Böhm et al. (2006b), juntamente com as correções ZTD baseadas no modelo de PNT/ECMWF.

Nota-se também que o RMS da acurácia altimétrica apresentou variação por região geográfica e por época de rastreo das observações. Isto já era esperado, visto que o atraso troposférico está relacionado com a componente hidrostática e úmida, dependendo assim de fatores como pressão, temperatura e umidade local. Por ser um país de dimensões continentais, o Brasil apresenta diferentes características topográficas e climáticas ao longo da sua extensão. Portanto, as coordenadas finais das estações, sobre o território brasileiro experimentam diferentes influências do atraso troposférico.

Para trabalhos futuros, recomenda-se um estudo das funções de mapeamento para os gradientes horizontais troposféricos estimados, além do comportamento desse parâmetro na melhoria da acurácia das coordenadas estimadas com a técnica PPP. Também se recomenda a análise dos modelos

de atraso troposférico no posicionamento relativo em rede de alta acurácia no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, A. T. M. **Precise point positioning for kinematic applications to improve hydrographic survey**. 152p. Thesis (Doctor of Engineering Sciences), University of Stuttgart, Stuttgart, 2016.

ABREU, P. A. G.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. **Aplicação e avaliação do modelo de Previsão Numérica do Tempo Eta15km no posicionamento absoluto**. Revista Brasileira de Cartografia - RBC, N° 66/3, p. 555-567, 2014.

ALBARICI, F. L. **Posicionamento relativo: análise dos resultados combinando as observáveis L1 dos satélites GPS e SBAS**. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Engenharia de Transporte), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ALMEIDA, M. S. **Posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo com GNSS: qual é o método mais acurado atualmente**. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil / Informações Espaciais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X. & MÉTIVIER, L. **Analysis and results of ITRF2008**. (IERS Technical Note; 37) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 54 pp., ISBN 978-3-86482-046-5 (print version), 2012.

ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; LEGRAND, J.; GARAYT, B. & BOUCHER, C. **ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters**, J. Geophys. Res. 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949. 2007.

ALVES, D. B. M.; ABREU, P. A. G.; SOUZA, J. S. **GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento**. Revista Brasileira de Geomática, v. 1, N°1, p. 8-13, 2013.

BAR-SEVER, Y. E.; KROGER, P. M.; BORJESSON, J. A. **Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver**. Journal Geophys, 103, p. 5019–5035, 1998.

BEVIS, M.; ALSDORF, D.; KENDRICK, E.; FORTES, L. P.; FORSBERG, B.; SMALLEY JUNIOR, R.; BECKER, J. **Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response**. Geophys. Res. Lett., Berlin, DD, v. 32, n. 16, p. 4. aug. 2005.

BÖHM, J.; MÖLLER, G.; SCHINDELEGGER, M.; PAIN, G.; WEBER, R. **Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)**. GPS Solutions, 19, n°. 3, p.433 –441. DOI: 10.1007/s10291-014-0403-7, 2014.

BÖHM, J.; SCHUH, H.; URQUHART, L.; STEIGENBERGER, P. SANTOS, M. **Troposphere Delay Modeling Based On Numerical Weather Models**, in: Proceedings of the 3rd International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme. Copenhagen, Denmark, 2011.

BÖHM, J.; HEINKELMANN, R.; SCHUH, H. **Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications**. J Geod, 81(10):679-683, 2007.

BÖHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. **Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data**. Geophys. Res. Lett. 33 (7), L07304, 2006a.

BÖHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. **Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data**. J. Geophys. Res. 111, B02406. 2006b.

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

BOEHM, J.; SCHUH, H. **Vienna Mapping Functions**, Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Leipzig, May 9-10, 2003, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodaesie, 131-143, 2003.

BOWRING, B. R. **Transformation from spatial to geographical coordinates**. Survey Review, v. 23, n. 181, p. 323–327, 1976.

BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. **Mudança de referencial e atualização de coordenadas entre o IGS14 (ITRF2014) e o SIRGAS2000 (ITRF2000)**. In: Simpósio Brasileiro de Geomática - SBG, 4., Presidente Prudente. Anais ... Presidente Prudente: UNESP, 2017. p .543-550, 2017.

BRUYNINX, C.; ALTAMIMI, Z.; CAPORALI, A.; KENYERES, A.; LIDBERG, M.; STANGL, G & TORRESS, G. A. **Guidelines for EUREF Densifications**. IAG sub-commission for the European Reference Frame, 2013.

CARVALHO, A. S. **Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa Sul-Americana.** 188f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil / Informações Espaciais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; GRIPP JÚNIOR, J.; LAROCCA, A. P. C.; KRUEGER, C. P. **Sistematização das etapas para determinação posicional em SIRGAS2000 com a base nas coordenadas ITRF (IGb08) obtidas por serviço PPP online.** Revista Brasileira de Cartografia -RBC, N°67/1, p 43-58, 2014.

CHEN, G.; T. A. HERRING. **Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data.** Journal of Geophysical Research, 102(B9):20489–20502. doi: 10.1029/97JB01739, 1997.

CHUERUBIM, M. L.; SEGANTINE, P. C. L.; SILVA, I. **O impacto dos modelos troposféricos no posicionamento GNSS de alta precisão em diferentes épocas e estações do ano.** Revista de Engenharia e Tecnologia, Curitiba, v. 8, N°2, p 44 – 54, 2016.

COLLINS, J. P. **Assessment and Development of a Tropospheric Delay Model for Aircraft Users of the Global Positioning System.** 174 p. M.Sc.E. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical, Report N°. 203, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999.

COLLINS, J. P.; LANGLEY, R. B. **A Tropospheric Delay Model for the User of the Wide Area Augmentation System.** Technical Report 187, The Geodetic Research Laboratory, Department of Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada, 1997.

DACH, R.; SIMON, L.; WALSER, P; FRIDEZ, P. **User manual of the Bernese GNSS Software 5.2,** Switzerland: AIUB, 852p, November of 2015.

DODO, J. D.; IDOWU, T.O. **Regional Assessment of the GPS Tropospheric Delay Models on the African GNSS Network,** J. Of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, 1-1,p113-121, 2010.

DREWES, H., O. HEIDBACH. **The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean.** In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposia, 136: 657-664, 2012.

FOELSCHE, U.; KIRCHENGAST, G. **A simple “geometric” mapping function for the hydrostatic delay at radio frequencies and assessment of its performance.** Geophys. Res. Lett. 29(10), 1473, doi:10.1029/2001GL013744. 2002.

FUND, F. **Observations GPS et retards troposphériques: modélisations et application aux effets de surcharge océanique dans l’Ouest de la France.** Thèse de Doctorat. Université de Nantes, 2009

GAPS (GNSS ANALYSIS AND POSITIONING SOFTWARE). **Precise Point Positioning Solution.** Disponível em: <<http://gaps.gge.unb.ca/>>. Acesso: 20 de maio de 2017.

GHODDOUSI-FARD, R. **Modelling tropospheric gradients and parameters from NWP models: Effects On GPS estimates.** Ph.D, dissertation, Dept. Geodesy Geomatics Eng., Univ. New Brunswick, Fredericton, NB, Canada, Tech. Rep. 264, pp. 216, 2009.

GHODDOUSI-FARD, R; DARE, P. **Online GPS processing services: an initial study.** GPS solutions, v. 10, n. 1, p. 12-20, 2006.

GMV, magicGNSS. **Precise Point Positioning Solution.** Disponível em: <<http://www.gmv.com/en/space/magicPPP/index.html>>. Acesso: 20 maio 2017.

GOAD, C. C.; L. GOODMAN. **A modified hopfield tropospheric refraction correction model.** In Proceedings of the Fall Annual Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, California, December 12–17, 1974.

GOUVEIA, T. A. F.; ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F. **Avaliação da acurácia e tempo de convergência do PPP com o uso de Previsão Numérica de Tempo na modelagem do atraso troposférico.** Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, n° 69/3, p. 433-455, 2017.

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.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 20, no 3, p.481-503, 2014.

HEIN, G. W. **From GPS and GLONASS via EGNOS to Galileo-Positioning and navigation in the third millennium.** Institute of Geodesy and Navigation, Proceedings. Germany. University FAF Munich. p 39-47.2000.

HERRING, T. A., **Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data**, In: Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Netherlands Geod. Commis. Ser. 36, edited by J. C. DeMunk and T. A. Spoelstra, pp. 157-164, Ned. Comm. voor Geod., Delft, 1992.

HERNANDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; RAMOS-BOSCH, P.; ROVIRA-GARCIA, A.; SALAZAR, D.; VENTURA-TRAVESET, J.; LOPEZ-ECHAZARRETA, C. & HEIN, G. **The ESA/UPC GNSS-Lab tool (gLAB): an advanced multipurpose package to process and analyse GNSS data**. In: 5th ESA Workshop on Satellite Navigation User, Noordwijk (The Netherlands), December 8th to 10th, 2010.

HESPER, E. T. **Investigations on the Use of GPS for Geodetic and Orbit Determination Applications**. Volume 649 de Report, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology. Report: LR-649. Editora Delft University Press, 44p, 1991.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag, 516p, 2008.

HOPFIELD, H. S. **Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data**. J Geophys, Res 74:4487–4499, 1969.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA) – **RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. Rio de Janeiro, RJ. 2017. Disponível em: < ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\_sobre\_posicionamento\_geodesico/rbmc/cartogramas/RBMC\_2017.png >. Acesso em: 03 outubro 2017.

IBGE-PPP. **Serviço de Posicionamento por Ponto Preciso *on-line***. Disponível em: < http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm >. Acesso: 15 maio 2017.

IERS (2016a). **International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). The International Terrestrial Reference System (ITRS)**. Disponível em: <https://www.iers.org/IERS/EN/Science/EarthRotation/EarthRotation.html>. Acesso em: 16 outubro 2016.

IERS (2016b). **International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). Measuring the irregularities of the Earth's rotation**. Disponível em: <https://www.iers.org/IERS/EN/Science/EarthRotation/EarthRotation.html>. Acesso em: 16 outubro 2016.

IERS (2016c). **International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). The International Terrestrial Reference Frame (ITRF)**. Disponível em: < <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>>. Acesso em: 16 outubro 2016.

IERS Conventions (2010). PETIT, G. & LUZUM, B (eds). **IERS Technical Note 36**. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 179 p., ISBN 3-89888-989-6. 2010. Disponível em<<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>>. Acesso em: 20 março 2017.

IFADIS, I. **The atmospheric delay of radio waves: Modeling the elevation dependence on a global scale**. In: Technical Report n°.38L, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1986.

IGS (2017). **International GNSS Service. IGS14 Reference Frame Transition**. Disponível em: < <http://www.igs.org/news/igs14-reference-frame-transition> >. Acesso: 20 fevereiro 2017.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Estações Automáticas – Gráficos**. Disponível em: [http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_auto\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf). Acesso em: 20 outubro 2017.

ITRF (2016). **International Terrestrial Reference Frame**. Disponível em: < [http://itrf.ensg.ign.fr/doc\\_ITRF/Transfo-ITRF2008\\_ITRFs.txt](http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt) >. Acesso em: 14 julho 2016.

JESUS, F. S. **Geografia do Brasil: Regiões - Características gerais, Clima, Relevo, Vegetação e Hidrografia**. Geografia Opinativa Blog 2017. Disponível em: <https://www.geografiaopinativa.com.br/2013/07/regiao-sudeste-caracteristicas-gerais.html>. Acesso: 06 de dezembro de 2017.

JPL (JET PROPULSION LABORATORY)/NASA. **APPS Automatic Precise Positioning Service**. California Institute of Technology. Disponível em: <<http://apps.gdgps.net/>>. Acesso: 15 maio 2017.

KARABATIC, A. **Precise Point Positioning (PPP) – an Alternative Technique for Ground Base GNSS Troposphere Monitoring**. Dissertation. Technische Universität Wien, Vienna, 2011.

KOUBA, J. **Testing of global pressure/temperature (GPT) model and global mapping function (GMF) in GPS analyses**, J. Geod., 83(3–4), 199–208, doi:10.1007/s00190-008-0229-6, 2008.

LANDSKRON, D.; BÖHM, J. **VMF3/GPT3: Refined discrete and empirical troposphere mapping functions.** Journal of Geodesy, <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>. 2017.

LEANDRO, R. F.; SANTOS, M. C.; LANGLEY, R.B. **UNB Neutral Atmosphere Models: Development and Performance.** Proceedings of ION NTM 2006, the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California, 18-20 January; pp. 564-573, 2006.

LEICK, A. **GPS satellite surveying.** 3.ed. United States: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

LI, W.; YUAN, Y. B; OU, J. K; LI, H; LI, Z. S. **A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications.** Chin SciBull 57:2132–2139. doi:10.1007/s11434-012-5010-9, 2012.

LOU, Y.; HUANG, J.; ZHANG, W.; LIANG, H.; ZHENG, F.; LIU, J. **A New Zenith Tropospheric Delay Grid Product for Real-Time PPP Applications over China.** Sensors, 18, 65, 2018.

MacMILLAN, D. **Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations.** Geophysical Research Letters, v. 22, p. 1041-1044. 1995.

MARINI, J. W. **Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile.** Radio Sci. v. 7, p. 223-231, 1972.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F.; SHIMABUKURO, M.; OYAMA, R. T.; WENTZ, J. P. **PPP em tempo real: fundamentos, implementação computacional e análises de resultados no modo estático e cinemático.** Revista Brasileira de Cartografia - RBC, nº 66/6, p. 1331-1345, 2014.

MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa do erro do relógio do satélite no contexto de rede GNSS.** 245 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2012.

McCATHY, D.D. **IERS Conventions (1996).** IERS Technical Note 13, Central Bureau of IERS – Observatoire de Paris, 1996.

MEINDL, M.; SCHAER, S.; HUGENTOBLE, U. & BEUTLER, G. **Tropospheric gradient estimation at code: Results from global solutions.** In al., R. A. A. et, editor, Applications of GPS Remote Sensing to Meteorology and Related Fields, volume 82(1B) of Journal of the Meteorological Society of Japan, pages 331–338. Meteorological Society of Japan, 2004.

MENDES, V. B. **Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques**. Tese (PhD) – Department of Geodesy and Geomatics, University of New Brunswick, 1998.

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

MONICO, J. J. **OP: Aplicações não convencionais do GNSS: GNSS e Meteorologia – Modelagem do ZND e suas aplicações**, 31 de maio de 2016. 55f. Notas de Aula. Disponível em: <[http://www2.fct.unesp.br/docentes/cartogalera/GNSS\\_N%E3o\\_Convenc/AulasTayna.pdf](http://www2.fct.unesp.br/docentes/cartogalera/GNSS_N%E3o_Convenc/AulasTayna.pdf)>. Acesso em: 23 novembro 2017.

MONICO, J. F. M.; 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, séc. Comunicações, Curitiba, vol.15, nº3, p.469-483, jul-set, 2009.

MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 476 p, 2008.

MONTENBRUCK, O.; STEIGENBERGER, P.; PRANGE, L.; DENG, Z.; ZHAO, Q.; PEROSANZ, F.; ROMERO, I.; NOLL, C.; STURZE, A.; WEBER, G. **The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS)- Achievements, prospects and challenges**. Adv. Space Res. 59, p.1671–1697, 2017.

MOUSA, A. E.; ABOUALY, N.; SHARAF, M.; ZAHRA, H.; DARRAG, M. **Tropospheric wet delay estimation using GNSS: Case study of permanent network in Egypt**. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, v. 5, nº1, p. 76-86, 2016.

NASCIMENTO, L. A. **Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP**. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

NIELL, A. **Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths**. Journal of Geophysical Research, v. 101, p. 3227-3246, 1996.

NRCAN (NATURAL RESOURCE CANADA). **CSRS-PPP an online GNSS Processing Service**. Disponível em: < [webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php](http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php) >. Acesso: 15 maio 2017.

OLIVEIRA JÚNIOR, P. S. **Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico no posicionamento GNSS de alta acurácia**. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.

OLIVEIRA JÚNIOR, P. S.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. **Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico na qualidade do posicionamento GNSS de alta acurácia**. Revista Brasileira de Cartografia, N° 69/2: 303-313, 2017.

OLIVEIRA, A. F.; ALVES, D. B. M.; FERREIRA, L. D. D. **Avaliação de Diferentes Modelos Troposféricos de Previsão Numérica de Tempo no Posicionamento em Redes**. Revista Brasileira de Cartografia, n° 66/3: 691-704, 2014.

RAMOS, M. P. **Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas no PPP**. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil / Informações Espaciais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

RAY, R. D.; PONTE, R. M. **Barometric tides from ECMWF operational analyses**. Annales Geophysicae, 21(8):1897–1910. doi: 10.5194/angeo-21-1897-2003. 2003.

REBISCHUNG, P.; SCHMID, R. **Preparations for the IGS realization of ITRF2014**. 2016. Disponível em: <<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7171.pdf>>. Acesso: 23 março 2017.

ROTHACHER, M. **Estimation of station heights with GPS**. In: DREWES, H.; DODSON, A.; FORTES, L.; SANCHEZ, L.; SANDOVAL, P. (eds). Vertical reference systems. Springer, International Association of Geodesy Symposia, 124:81-90. 228 p., 2002.

ROTHACHER, M.; BEUTLER, G.; GURTNER, W.; GEIGER, A.; KAHLE, H. G.; SCHNEIDER, D. **The Swiss 1985 GPS campaign**. In Proceedings of the Fourth International Symposium on Satellite Positioning, volume 2, pages 979–991, Austin, Texas, 1986.

SAASTAMOINEN, J. **Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites**. the use of artificial satellites for geodesy, Geophys. Monogr., 15 (3), p. 247–251. 1972.

SAHA, K.; RAJU, C. S.; PARAMESWARAN, K. **A new hydrostatic mapping function for tropospheric delay estimation**. J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 72-1, p. 125-134, 2010.

SAKIDIN, H.; BAKAR, M. R. A.; SHARIFF, A. R. M.; NOORANI, M. S. M.; MATORI, A. N.; MOHAMED, A. **Effect of GPS tropospheric delay Neill mapping function simplification**. Malaysian Journal of Mathematical Sciences, 3(1), p. 95-107, 2009.

SANZ SUBIRANA, J.; JUAN ZORNOZA, J. M.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M. **GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms**. Publisher: ESA Communications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, ISBN 978-92-9221-886-7, 2013.

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. N.58/3, 2006.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia**. 200 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G. **Modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico para América do Sul empregando previsão numérica de tempo**. In: I SIMGEO, 2004. Recife. Anais I SIMGEO, 2004.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ESPINOZA, E. S.; MACHADO, L. A. T. **Predição do Atraso Zenital Troposférico na América do Sul para posicionamento GNSS em Tempo Real**. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Paraná, Curitiba, 2003. Anais...2003.

SAPUCCI, L.F.; MONICO, J.F.G. **Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território brasileiro utilizando GPS**. In: Séries em Ciências Geodésicas 30 anos de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil. Curitiba, Vol. 1, p. 47-61, 2001a.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e a avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 167f. Dissertação de Mestrado, UNESP, Presidente Prudente-SP, Brasil, 2001b.

SAPUCCI, L.F; MONICO, J.F.G. **Transformação de Helmert Generalizada no posicionamento de alta precisão: Fundamentação teórica e exemplificações**. Revista Brasileira de Geofísica, ISSN 0102-261X, Vol. 18, p. 161-172, 2000.

SCHÜLER, T. **The TropGrid2 standard tropospheric correction model**. GPS Solut 18(1):123–131, 2014.

SCHÜLER, T. **On ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation**. 364 p. Ph.D. Dissertation. Universität der Bundeswehr, Munich, 2001.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2.ed., Berlin, New York: Walter de Gruyter, 589p, 2003.

SILVA, N.; SANTOS, M.; OLIVEIRA, L. **Efeito da refração troposférica no posicionamento geodésico com GPS**. Rev. Bras. Geof., 17(2-3):117–128, 1999.

SIRGAS (2017a). **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS)**. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Sanchez\\_et\\_al\\_SIRGAS\\_EG\\_U2009\\_April\\_2009\\_.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Sanchez_et_al_SIRGAS_EG_U2009_April_2009_.pdf)>. Acesso em: 16 outubro 2017.

SIRGAS (2017b). **Use of velocities in the processing of GNSS data**. Disponível em: < <http://www.sirgas.org/en/velocity-model/using-velocities-gnss/>> Acesso em: 18 fevereiro 2017.

SIRGAS (2017c). **SIRGAS 1995**. Disponível em: < <http://www.sirgas.org/en/sirgas-realizations/>> Acesso em: 18 novembro 2017.

SIRGAS (2017d). **SIRGAS 2000**. Disponível em: < <http://www.sirgas.org/en/sirgas-realizations/sirgas2000/>> Acesso em: 18 novembro 2017.

SIRGAS (2017e). **Rede SIRGAS de operações contínua**. Disponível em: < <http://www.sirgas.org/en/sirgas-realizations/sirgas-rf/>> Acesso em: 18 novembro 2017.

SNAY, R. A.; SOLER, T. **Modern Terrestrial Reference Systems (Part 1)**. Professional Surveyor, 19(10):32–33, December 1999. Disponível em: <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/datum/datum.html>. Acesso em: 18 novembro 2016.

SOLER, T; SNAY, R. A. **Transforming positions and velocities between the International Terrestrial Reference Frame of 2000 e North American datum of 1983**. Journal of Surveying Engineering. v. 130, nº.2 p. 49-55, May 1, 2004.

SPIPKER, J. J. **Tropospheric Effects on GPS**. In: PARKINSON, B.W.; SPIPKER, J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**, v.1, Cambridge, American Institute of Aeronautics and Astronautics, p.517-46, 1996.

TEUNISSEN, P. J. G., KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. Springer - Verlag. Berlin Heidelberg New York. 640 p., 1998.

TORGE, W. **Geodesy**. 3. ed. New York: de Gruyter, 2001.

VMF1 (2017): **Vienna Mapping Function**. Disponível em: <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/>. Acesso em 27 de novembro de 2017.

WESTON, N. D.; SOLER, T. **Rigorous Geodetic Positioning in the Americas**. 2012. Disponível em: <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/Weston-SolerFIG-2012-Montevideo.pdf>. Acesso: 22 março 2017

WIELGOSZ, P.; PAZIEWSKI, J.; KRANKOWSKI, A.; KROSZCZYŃSKI, K.; FIGURSKI, M. **Results of the application of tropospheric corrections from different troposphere models for precise GPS rapid static positioning**, Acta Geophysica, vol. 60, no. 4, Aug., p. 1236-1257, 2012.

WIELGOSZ, P.; PAZIEWSKI, J.; BARYŁA, R. **On constraining Zenith tropospheric delays in processing of local GPS networks with Bernese software**. Surv Rev 43(323): p.472–483, 2011.

XU, G.; XU, Y. **GPS: Theory, Algorithms and Applications**; 3rd Edition; Springer: Heidelberg, Germany, p. 508, 2016.

## APÊNDICES

APÊNDICE 01: Lista das coordenadas das estações RBMC após a transformação e atualização das mesmas utilizando o modelo de velocidades VEMOS2009, e os parâmetros de transformação recomendados pelo IERS.

Tabela 10 - Coordenadas cartesianas, ITRF 2008 - Época 2016,096 (Verão)

<b>Centro-Oeste</b>			
CUIB	3430711,379	-5099641,628	-1699432,737
GOGY	3989705,198	-4631044,650	-1817529,835
GOJA	3761502,402	-4767353,046	-1946325,792
GOUR	4040466,668	-4671618,387	-1587717,805
MSCG	3468912,080	-4870550,497	-2213735,344
MSDR	3395050,187	-4836120,506	-2394508,435
MTCN	3795147,557	-4905277,147	-1485352,860
MTCO	3553110,802	-5161363,472	-1187759,850
MTJI	3246029,077	-5343733,949	-1257760,037
MTSF	3960733,813	-4832787,771	-1276214,979
<b>Nordeste</b>			
ALAR	5043729,704	-3753105,609	-1072966,871
BABR	4410351,430	-4409565,683	-1333726,513
BAIL	4781750,306	-3896064,306	-1618362,468
BAIR	4659351,633	-4174512,256	-1242318,787
BAIT	4750448,513	-4027056,749	-1373818,378
BATF	4677358,316	-3889198,878	-1911503,822
BAVC	4667609,326	-4029356,571	-1628384,748
CEFT	4983062,722	-3959862,948	-410039,393
CESB	4851781,779	-4120070,666	-406782,825
CRAT	4888826,012	-4017957,500	-798308,822
IMPZ	4289656,397	-4680884,992	-606347,130
MABB	4512204,445	-4483272,746	-468521,774
MABS	4389634,226	-4551909,736	-830725,071
PBCG	5125899,403	-3711505,678	-795650,428
PBJP	5192505,796	-3618762,834	-787096,730

PEAF	5005578,926	-3859264,085	-856010,145
PEPE	4785329,925	-4087942,534	-1033193,813
PICR	4422865,321	-4449687,027	-1147157,220
PIFL	4629166,874	-4322988,911	-748885,356
PISR	4629725,251	-4272600,342	-994572,427
PITN	4661982,621	-4315989,885	-563478,501
RECF	5176588,637	-3618162,210	-887363,724
RNMO	5051170,156	-3851509,539	-574681,200
RNNA	5184572,499	-3658358,295	-644238,457
RNPF	4983525,000	-3922609,330	-676771,834
SAVO	4870283,749	-3864605,339	-1418872,429
SEAJ	4995143,875	-3778384,019	-1201364,741

**Norte**

AMCO	2652254,902	-5775435,424	-538086,973
AMHA	2868133,032	-5635932,847	-828833,375
AMPR	3494888,815	-5327414,537	-290845,752
AMTE	2720483,560	-5756956,910	-369743,783
AMUA	3182722,879	-5516674,546	-341716,915
BELE	4228138,990	-4772752,127	-155761,173
BOAV	3117452,162	-5555487,826	314480,928
CRUZ	1883105,445	-6035606,271	-839206,127
ITAM	3334181,187	-5426224,182	-345418,175
MABA	4156055,611	-4801656,555	-592100,460
MAPA	4005461,107	-4963550,350	5162,445
PAAT	3904887,666	-5030761,075	-353774,863
PASM	3679758,408	-5202671,917	-268392,888
POVE	2774265,562	-5662060,172	-959415,816
RIOB	2373576,788	-5817088,390	-1096515,573
ROCD	3055332,331	-5409951,430	-1438685,179
ROGM	2615472,439	-5694455,920	-1185599,741
SAGA	2486243,725	-5873685,322	-15906,637
TOGU	4093503,225	-4717194,880	-1290037,655
TOPL	4174345,597	-4690236,760	-1118921,232

**Sudeste**

CEFE	4562488,501	-3871935,879	-2200001,382
ILHA	3735306,333	-4669666,448	-2212269,292
JAMG	4442830,852	-4255590,252	-1678958,823
MGBH	4320741,817	-4161560,549	-2161984,055
MGIN	4076879,958	-4270391,007	-2407417,954
MGMC	4406284,945	-4234092,895	-1822973,627
MGRP	4176141,957	-4344591,247	-2085669,592
MGUB	4019130,606	-4504012,622	-2055168,624
NEIA	3875254,981	-4292588,787	-2681108,583
POLI	4010099,509	-4259927,383	-2533538,617
PPTTE	3687624,372	-4620818,754	-2386880,192
RIOD	4280294,882	-4034431,312	-2458141,194
RJCG	4450354,269	-3913332,877	-2350256,198
ROSA	3551520,492	-4704836,183	-2428155,542
SPBO	3902211,613	-4400160,628	-2461983,446
SPFR	4046871,170	-4398880,602	-2221086,481
SPJA	3957806,697	-4440069,859	-2296499,690
SPPI	3968093,628	-4349216,513	-2446632,121
SPTU	3766123,318	-4567433,539	-2367323,647
UBA1	4129567,813	-4146743,101	-2527616,362
VICO	4373283,316	-4059639,130	-2246959,534
<b>Sul</b>			
IFSC	3745131,636	-4239371,606	-2936760,380
POAL	3467519,431	-4300378,621	-3177517,549
PRCV	3444651,938	-4649463,132	-2675662,553
PRGU	3590927,142	-4512405,724	-2718013,185
PRMA	3610720,842	-4611288,474	-2518636,154
RSAL	3116428,489	-4580325,035	-3150197,258
RSCL	3248119,604	-4596793,071	-2990511,251
RSPE	3309121,029	-4299717,274	-3341854,011
SCAQ	3770474,621	-4297501,722	-2818213,057
SCCH	3450305,462	-4512731,750	-2892128,081
SCLA	3606986,082	-4345293,330	-2956654,027
SMAR	3280748,437	-4468909,829	-3143408,503
UFPR	3763751,690	-4365113,913	-2724404,530

Tabela 11 - Coordenadas cartesianas, ITRF 2008 - Época 2016, 344 (Outono)

<b>Centro-Oeste</b>			
CUIB	3430711,379	-5099641,629	-1699432,734
GOGY	3989705,198	-4631044,652	-1817529,833
GOJA	3761502,402	-4767353,047	-1946325,789
GOUR	4040466,667	-4671618,388	-1587717,802
MSCG	3468912,080	-4870550,498	-2213735,341
MSDR	3395050,187	-4836120,507	-2394508,432
MTCN	3795147,557	-4905277,148	-1485352,857
MTCO	3553110,802	-5161363,473	-1187759,847
MTJI	3246029,077	-5343733,950	-1257760,034
MTSF	3960733,813	-4832787,772	-1276214,976
<b>Nordeste</b>			
ALAR	5043729,704	-3753105,610	-1072966,868
BABR	4410351,430	-4409565,685	-1333726,510
BAIL	4781750,306	-3896064,307	-1618362,466
BAIR	4659351,633	-4174512,257	-1242318,784
BAIT	4750448,513	-4027056,750	-1373818,375
BATF	4677358,316	-3889198,879	-1911503,819
BAVC	4667609,326	-4029356,572	-1628384,745
CEFT	4983062,722	-3959862,949	-410039,390
CESB	4851781,778	-4120070,667	-406782,822
CRAT	4888826,012	-4017957,501	-798308,819
IMPZ	4289656,397	-4680884,993	-606347,127
MABB	4512204,444	-4483272,746	-468521,771
MABS	4389634,226	-4551909,737	-830725,068
PBCG	5125899,403	-3711505,679	-795650,425
PBJP	5192505,795	-3618762,835	-787096,727
PEAF	5005578,925	-3859264,085	-856010,142
PEPE	4785329,925	-4087942,535	-1033193,810
PICR	4422865,320	-4449687,028	-1147157,217
PIFL	4629166,874	-4322988,912	-748885,353
PISR	4629725,250	-4272600,343	-994572,424
PITN	4661982,621	-4315989,886	-563478,498
RECF	5176588,637	-3618162,211	-887363,722

RNMO	5051170,155	-3851509,540	-574681,197
RNNA	5184572,499	-3658358,296	-644238,454
RNPF	4983525,000	-3922609,331	-676771,831
SAVO	4870283,749	-3864605,340	-1418872,426
SEAJ	4995143,874	-3778384,020	-1201364,738

**Norte**

AMCO	2652254,902	-5775435,425	-538086,970
AMHA	2868133,032	-5635932,848	-828833,372
AMPR	3494888,814	-5327414,538	-290845,749
AMTE	2720483,560	-5756956,910	-369743,780
AMUA	3182722,878	-5516674,547	-341716,912
BELE	4228138,989	-4772752,128	-155761,170
BOAV	3117452,161	-5555487,826	314480,931
CRUZ	1883105,445	-6035606,272	-839206,124
ITAM	3334181,186	-5426224,183	-345418,172
MABA	4156055,611	-4801656,556	-592100,457
MAPA	4005461,106	-4963550,350	5162,448
PAAT	3904887,666	-5030761,076	-353774,860
PASM	3679758,407	-5202671,917	-268392,885
POVE	2774265,561	-5662060,173	-959415,813
RIOB	2373576,788	-5817088,391	-1096515,570
ROCD	3055332,331	-5409951,431	-1438685,176
ROGM	2615472,438	-5694455,921	-1185599,738
SAGA	2486243,724	-5873685,322	-15906,635
TOGU	4093503,225	-4717194,881	-1290037,652
TOPL	4174345,597	-4690236,761	-1118921,229

**Sudeste**

CEFE	4562488,501	-3871935,881	-2200001,379
ILHA	3735306,333	-4669666,450	-2212269,289
JAMG	4442830,852	-4255590,253	-1678958,820
MGBH	4320741,817	-4161560,551	-2161984,053
MGIN	4076879,958	-4270391,009	-2407417,951
MGMC	4406284,945	-4234092,896	-1822973,625
MGRP	4176141,957	-4344591,249	-2085669,590
MGUB	4019130,606	-4504012,623	-2055168,621

NEIA	3875254,981	-4292588,789	-2681108,580
POLI	4010099,509	-4259927,385	-2533538,615
PPTE	3687624,372	-4620818,755	-2386880,190
RIOD	4280294,882	-4034431,314	-2458141,192
RJCG	4450354,269	-3913332,878	-2350256,195
ROSA	3551520,493	-4704836,184	-2428155,539
SPBO	3902211,613	-4400160,629	-2461983,444
SPFR	4046871,170	-4398880,603	-2221086,479
SPJA	3957806,697	-4440069,860	-2296499,687
SPPI	3968093,628	-4349216,514	-2446632,118
SPTU	3766123,318	-4567433,540	-2367323,644
UBA1	4129567,813	-4146743,103	-2527616,359
VICO	4373283,316	-4059639,131	-2246959,531
<b>Sul</b>			
IFSC	3745131,636	-4239371,608	-2936760,378
POAL	3467519,432	-4300378,622	-3177517,546
PRCV	3444651,938	-4649463,133	-2675662,550
PRGU	3590927,142	-4512405,726	-2718013,182
PRMA	3610720,842	-4611288,476	-2518636,151
RSAL	3116428,490	-4580325,036	-3150197,256
RSCL	3248119,604	-4596793,073	-2990511,248
RSPE	3309121,029	-4299717,275	-3341854,008
SCAQ	3770474,621	-4297501,724	-2818213,054
SCCH	3450305,462	-4512731,751	-2892128,078
SCLA	3606986,082	-4345293,331	-2956654,024
SMAR	3280748,437	-4468909,831	-3143408,500
UFPR	3763751,690	-4365113,915	-2724404,527

Tabela 12 - Coordenadas cartesianas, ITRF 2008 - Época 2016,598 (Inverno)

<b>Centro-Oeste</b>			
CUIB	3430711,379	-5099641,628	-1699432,737
GOGY	3989705,198	-4631044,650	-1817529,835
GOJA	3761502,402	-4767353,046	-1946325,792
GOUR	4040466,668	-4671618,387	-1587717,805
MSCG	3468912,080	-4870550,497	-2213735,344

MSDR	3395050,187	-4836120,506	-2394508,435
MTCN	3795147,557	-4905277,147	-1485352,860
MTCO	3553110,802	-5161363,472	-1187759,850
MTJI	3246029,077	-5343733,949	-1257760,037
MTSF	3960733,813	-4832787,771	-1276214,979
<b>Nordeste</b>			
ALAR	5043729,704	-3753105,609	-1072966,871
BABR	4410351,430	-4409565,683	-1333726,513
BAIL	4781750,306	-3896064,306	-1618362,468
BAIR	4659351,633	-4174512,256	-1242318,787
BAIT	4750448,513	-4027056,749	-1373818,378
BATF	4677358,316	-3889198,878	-1911503,822
BAVC	4667609,326	-4029356,571	-1628384,748
CEFT	4983062,722	-3959862,948	-410039,393
CESB	4851781,779	-4120070,666	-406782,825
CRAT	4888826,012	-4017957,500	-798308,822
IMPZ	4289656,397	-4680884,992	-606347,130
MABB	4512204,445	-4483272,746	-468521,774
MABS	4389634,226	-4551909,736	-830725,071
PBCG	5125899,403	-3711505,678	-795650,428
PBJP	5192505,796	-3618762,834	-787096,730
PEAF	5005578,926	-3859264,085	-856010,145
PEPE	4785329,925	-4087942,534	-1033193,813
PICR	4422865,321	-4449687,027	-1147157,220
PIFL	4629166,874	-4322988,911	-748885,356
PISR	4629725,251	-4272600,342	-994572,427
PITN	4661982,621	-4315989,885	-563478,501
RECF	5176588,637	-3618162,210	-887363,724
RNMO	5051170,156	-3851509,539	-574681,200
RNNA	5184572,499	-3658358,295	-644238,457
RNPF	4983525,000	-3922609,330	-676771,834
SAVO	4870283,749	-3864605,339	-1418872,429
SEAJ	4995143,875	-3778384,019	-1201364,741
<b>Norte</b>			
AMCO	2652254,902	-5775435,424	-538086,973

AMHA	2868133,032	-5635932,847	-828833,375
AMPR	3494888,815	-5327414,537	-290845,752
AMTE	2720483,560	-5756956,910	-369743,783
AMUA	3182722,879	-5516674,546	-341716,915
BELE	4228138,990	-4772752,127	-155761,173
BOAV	3117452,162	-5555487,826	314480,928
CRUZ	1883105,445	-6035606,271	-839206,127
ITAM	3334181,187	-5426224,182	-345418,175
MABA	4156055,611	-4801656,555	-592100,460
MAPA	4005461,107	-4963550,350	5162,445
PAAT	3904887,666	-5030761,075	-353774,863
PASM	3679758,408	-5202671,917	-268392,888
POVE	2774265,562	-5662060,172	-959415,816
RIOB	2373576,788	-5817088,390	-1096515,573
ROCD	3055332,331	-5409951,430	-1438685,179
ROGM	2615472,439	-5694455,920	-1185599,741
SAGA	2486243,725	-5873685,322	-15906,637
TOGU	4093503,225	-4717194,880	-1290037,655
TOPL	4174345,597	-4690236,760	-1118921,232
<b>Sudeste</b>			
CEFE	4562488,501	-3871935,879	-2200001,382
ILHA	3735306,333	-4669666,448	-2212269,292
JAMG	4442830,852	-4255590,252	-1678958,823
MGBH	4320741,817	-4161560,549	-2161984,055
MGIN	4076879,958	-4270391,007	-2407417,954
MGMC	4406284,945	-4234092,895	-1822973,627
MGRP	4176141,957	-4344591,247	-2085669,592
MGUB	4019130,606	-4504012,622	-2055168,624
NEIA	3875254,981	-4292588,787	-2681108,583
POLI	4010099,509	-4259927,383	-2533538,617
PPTE	3687624,372	-4620818,754	-2386880,192
RIOD	4280294,882	-4034431,312	-2458141,194
RJCG	4450354,269	-3913332,877	-2350256,198
ROSA	3551520,492	-4704836,183	-2428155,542
SPBO	3902211,613	-4400160,628	-2461983,446

SPFR	4046871,170	-4398880,602	-2221086,481
SPJA	3957806,697	-4440069,859	-2296499,690
SPPI	3968093,628	-4349216,513	-2446632,121
SPTU	3766123,318	-4567433,539	-2367323,647
UBA1	4129567,813	-4146743,101	-2527616,362
VICO	4373283,316	-4059639,130	-2246959,534
<b>Sul</b>			
IFSC	3745131,636	-4239371,606	-2936760,380
POAL	3467519,431	-4300378,621	-3177517,549
PRCV	3444651,938	-4649463,132	-2675662,553
PRGU	3590927,142	-4512405,724	-2718013,185
PRMA	3610720,842	-4611288,474	-2518636,154
RSAL	3116428,489	-4580325,035	-3150197,258
RSCL	3248119,604	-4596793,071	-2990511,251
RSPE	3309121,029	-4299717,274	-3341854,011
SCAQ	3770474,621	-4297501,722	-2818213,057
SCCH	3450305,462	-4512731,750	-2892128,081
SCLA	3606986,082	-4345293,330	-2956654,027
SMAR	3280748,437	-4468909,829	-3143408,503
UFPR	3763751,690	-4365113,913	-2724404,530

Tabela 13 - Coordenadas cartesianas, ITRF 2008 - Época 2016, 956 (Primavera)

<b>Centro-Oeste</b>			
CUIB	3430711,378	-5099641,631	-1699432,728
GOGY	3989705,198	-4631044,654	-1817529,827
GOJA	3761502,401	-4767353,050	-1946325,784
GOUR	4040466,667	-4671618,391	-1587717,796
MSCG	3468912,080	-4870550,500	-2213735,336
MSDR	3395050,187	-4836120,510	-2394508,426
MTCN	3795147,556	-4905277,150	-1485352,851
MTCO	3553110,801	-5161363,475	-1187759,841
MTJI	3246029,076	-5343733,952	-1257760,028
MTSF	3960733,812	-4832787,774	-1276214,970
<b>Nordeste</b>			
ALAR	5043729,704	-3753105,612	-1072966,862

BABR	4410351,429	-4409565,687	-1333726,504
BAIL	4781750,306	-3896064,310	-1618362,460
BAIR	4659351,632	-4174512,259	-1242318,778
BAIT	4750448,512	-4027056,752	-1373818,369
BATF	4677358,316	-3889198,882	-1911503,813
BAVC	4667609,326	-4029356,575	-1628384,739
CEFT	4983062,721	-3959862,950	-410039,384
CESB	4851781,777	-4120070,668	-406782,816
CRAT	4888826,011	-4017957,503	-798308,813
IMPZ	4289656,395	-4680884,995	-606347,121
MABB	4512204,443	-4483272,748	-468521,765
MABS	4389634,225	-4551909,739	-830725,062
PBCG	5125899,402	-3711505,681	-795650,419
PBJP	5192505,795	-3618762,836	-787096,721
PEAF	5005578,925	-3859264,087	-856010,136
PEPE	4785329,924	-4087942,537	-1033193,804
PICR	4422865,320	-4449687,030	-1147157,211
PIFL	4629166,873	-4322988,914	-748885,347
PISR	4629725,249	-4272600,345	-994572,418
PITN	4661982,620	-4315989,887	-563478,493
RECF	5176588,636	-3618162,213	-887363,716
RNMO	5051170,155	-3851509,542	-574681,192
RNNA	5184572,498	-3658358,297	-644238,448
RNPF	4983524,999	-3922609,333	-676771,825
SAVO	4870283,749	-3864605,342	-1418872,421
SEAJ	4995143,874	-3778384,022	-1201364,732

**Norte**

AMCO	2652254,900	-5775435,426	-538086,964
AMHA	2868133,030	-5635932,849	-828833,367
AMPR	3494888,812	-5327414,539	-290845,743
AMTE	2720483,558	-5756956,911	-369743,774
AMUA	3182722,875	-5516674,548	-341716,906
BELE	4228138,987	-4772752,129	-155761,164
BOAV	3117452,160	-5555487,827	314480,937
CRUZ	1883105,444	-6035606,273	-839206,118

ITAM	3334181,184	-5426224,184	-345418,166
MABA	4156055,609	-4801656,558	-592100,451
MAPA	4005461,105	-4963550,351	5162,454
PAAT	3904887,664	-5030761,077	-353774,854
PASM	3679758,405	-5202671,919	-268392,879
POVE	2774265,559	-5662060,175	-959415,808
RIOB	2373576,787	-5817088,392	-1096515,564
ROCD	3055332,330	-5409951,432	-1438685,171
ROGM	2615472,438	-5694455,922	-1185599,733
SAGA	2486243,723	-5873685,322	-15906,629
TOGU	4093503,224	-4717194,883	-1290037,646
TOPL	4174345,596	-4690236,763	-1118921,223

**Sudeste**

CEFE	4562488,501	-3871935,884	-2200001,373
ILHA	3735306,333	-4669666,452	-2212269,283
JAMG	4442830,852	-4255590,255	-1678958,814
MGBH	4320741,817	-4161560,553	-2161984,047
MGIN	4076879,958	-4270391,011	-2407417,945
MGMC	4406284,945	-4234092,899	-1822973,619
MGRP	4176141,956	-4344591,251	-2085669,584
MGUB	4019130,606	-4504012,625	-2055168,616
NEIA	3875254,981	-4292588,792	-2681108,575
POLI	4010099,510	-4259927,388	-2533538,609
PPTE	3687624,372	-4620818,758	-2386880,184
RIOD	4280294,883	-4034431,317	-2458141,186
RJCG	4450354,270	-3913332,881	-2350256,190
ROSA	3551520,493	-4704836,187	-2428155,533
SPBO	3902211,614	-4400160,632	-2461983,438
SPFR	4046871,170	-4398880,606	-2221086,473
SPJA	3957806,697	-4440069,863	-2296499,681
SPPI	3968093,628	-4349216,517	-2446632,113
SPTU	3766123,318	-4567433,543	-2367323,639
UBA1	4129567,813	-4146743,105	-2527616,354
VICO	4373283,316	-4059639,134	-2246959,526

**Sul**

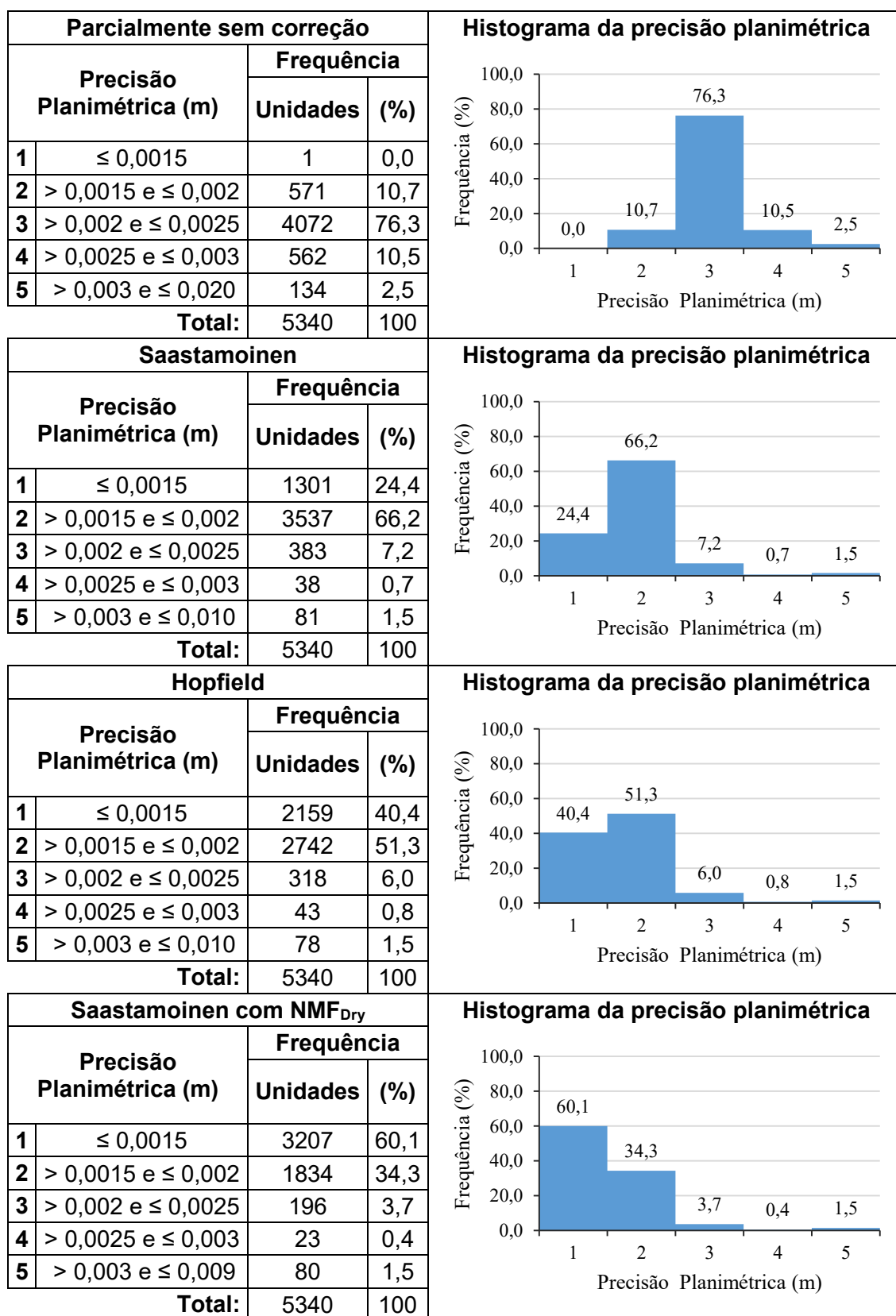
IFSC	3745131,637	-4239371,611	-2936760,372
POAL	3467519,433	-4300378,625	-3177517,541
PRCV	3444651,939	-4649463,136	-2675662,544
PRGU	3590927,143	-4512405,729	-2718013,177
PRMA	3610720,842	-4611288,478	-2518636,146
RSAL	3116428,491	-4580325,039	-3150197,250
RSCL	3248119,605	-4596793,076	-2990511,243
RSPE	3309121,030	-4299717,278	-3341854,003
SCAQ	3770474,622	-4297501,726	-2818213,049
SCCH	3450305,463	-4512731,754	-2892128,073
SCLA	3606986,083	-4345293,334	-2956654,019
SMAR	3280748,438	-4468909,834	-3143408,495
UFPR	3763751,691	-4365113,918	-2724404,521

APÊNDICE 02: Lista das velocidades das estações RBMC - o modelo de velocidades VEMOS2009 - ITRF2005.

VEMOS:Interpolated from VEMOS2009 in ITRF2005 (Drewes and Heidbach 2009)								
Station	Latitude	Longitude	v(Lat)	v(Long)	v(X)	v(Y)	v(Z)	no
SAVO	-12.939	-38.432	0.0118	-0.0032	0.0001	-0.0042	0.0115	4
SEAJ	-10.930	-37.104	0.0118	-0.0035	-0.0003	-0.0041	0.0116	4
AMCO	-4.872	-65.334	0.0113	-0.0030	-0.0023	-0.0021	0.0113	4
AMHA	-7.517	-63.028	0.0109	-0.0037	-0.0026	-0.0029	0.0108	4
AMMU	-3.397	-57.709	0.0116	-0.0042	-0.0032	-0.0028	0.0116	4
AMPR	-2.631	-56.734	0.0117	-0.0041	-0.0031	-0.0027	0.0117	4
AMTE	-3.346	-64.707	0.0113	-0.0034	-0.0028	-0.0020	0.0113	4
AMUA	-3.092	-60.018	0.0112	-0.0054	-0.0044	-0.0032	0.0112	4
APLJ	-0.822	-52.516	0.0120	-0.0037	-0.0029	-0.0024	0.0120	4
BELE	-1.409	-48.463	0.0125	-0.0045	-0.0032	-0.0032	0.0125	4
BOAV	2.845	-60.701	0.0115	-0.0033	-0.0031	-0.0011	0.0115	4
COAM	-4.098	-63.145	0.0113	-0.0036	-0.0029	-0.0024	0.0113	4
CRUZ	-7.611	-72.672	0.0116	-0.0010	-0.0005	-0.0018	0.0115	4
ITAM	-3.125	-58.431	0.0115	-0.0044	-0.0034	-0.0028	0.0115	4
MABA	-5.362	-49.122	0.0120	-0.0040	-0.0023	-0.0034	0.0120	4
MAPA	0.047	-51.097	0.0122	-0.0037	-0.0029	-0.0023	0.0122	4
NAUS	-3.023	-60.055	0.0112	-0.0054	-0.0044	-0.0032	0.0112	4
PAAT	-3.201	-52.181	0.0120	-0.0039	-0.0027	-0.0029	0.0120	4
PASM	-2.428	-54.729	0.0118	-0.0039	-0.0029	-0.0027	0.0118	4
POVE	-8.709	-63.896	0.0102	-0.0043	-0.0032	-0.0033	0.0100	4
RIOB	-9.965	-67.803	0.0120	-0.0011	-0.0002	-0.0023	0.0118	4
ROCD	-13.122	-60.544	0.0118	-0.0023	-0.0007	-0.0035	0.0115	4
ROGM	-10.784	-65.331	0.0116	-0.0010	0.0000	-0.0024	0.0114	4
SAGA	-0.144	-67.058	0.0113	-0.0029	-0.0026	-0.0011	0.0113	4
TOGU	-11.747	-49.049	0.0121	-0.0036	-0.0011	-0.0042	0.0118	4
TOPL	-10.171	-48.331	0.0120	-0.0037	-0.0013	-0.0040	0.0118	4
CEFE	-20.311	-40.319	0.0122	-0.0039	0.0007	-0.0057	0.0114	4
ILHA	-20.428	-51.343	0.0119	-0.0028	0.0004	-0.0050	0.0111	4
JAMG	-15.363	-43.767	0.0122	-0.0035	-0.0001	-0.0048	0.0117	4
MGBH	-19.942	-43.925	0.0120	-0.0035	0.0005	-0.0054	0.0113	4
MGIN	-22.319	-46.328	0.0116	-0.0033	0.0007	-0.0054	0.0107	4
MGMC	-16.716	-43.858	0.0119	-0.0033	0.0002	-0.0047	0.0114	4
MGRP	-19.210	-46.133	0.0117	-0.0034	0.0002	-0.0051	0.0110	4
MGUB	-18.919	-48.256	0.0113	-0.0034	-0.0001	-0.0050	0.0107	4
NEIA	-25.020	-47.925	0.0123	-0.0031	0.0012	-0.0059	0.0111	3
POLI	-23.556	-46.730	0.0117	-0.0033	0.0008	-0.0056	0.0107	4
PPTE	-22.120	-51.409	0.0120	-0.0026	0.0008	-0.0051	0.0111	4
RIOD	-22.818	-43.306	0.0119	-0.0038	0.0007	-0.0059	0.0109	4
RJCG	-21.765	-41.326	0.0122	-0.0038	0.0009	-0.0058	0.0113	4
ROSA	-22.523	-52.952	0.0122	-0.0023	0.0009	-0.0051	0.0112	4

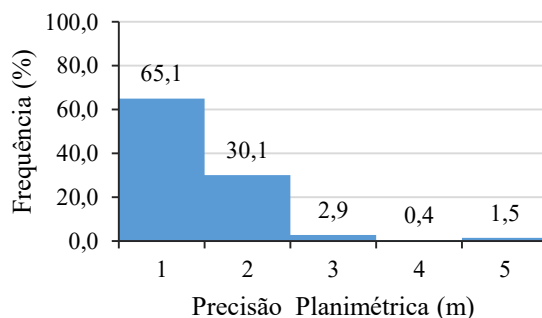
VEMOS: Interpolated from VEMOS2009 in ITRF2005 (Drewes and Heidbach 2009)								
Station	Latitude	Longitude	v(Lat)	v(Long)	v(X)	v(Y)	v(Z)	no
CUIB	-15.555	-56.070	0.0120	-0.0035	-0.0011	-0.0046	0.0115	4
GOGY	-16.665	-49.255	0.0119	-0.0034	-0.0004	-0.0048	0.0114	4
GOJA	-17.883	-51.726	0.0120	-0.0031	-0.0002	-0.0048	0.0114	4
GOUR	-14.509	-49.144	0.0121	-0.0035	-0.0007	-0.0046	0.0117	4
MSCG	-20.441	-54.541	0.0120	-0.0025	0.0004	-0.0049	0.0112	4
MSDR	-22.194	-54.930	0.0121	-0.0022	0.0008	-0.0050	0.0112	4
MTCN	-13.556	-52.271	0.0120	-0.0034	-0.0010	-0.0043	0.0117	4
MTCO	-10.804	-55.456	0.0119	-0.0032	-0.0014	-0.0037	0.0117	4
MTJI	-11.449	-58.724	0.0118	-0.0030	-0.0013	-0.0035	0.0116	4
MTSF	-11.619	-50.664	0.0120	-0.0035	-0.0012	-0.0041	0.0118	4
MTSR	-12.545	-55.727	0.0119	-0.0033	-0.0012	-0.0040	0.0117	4
ALAR	-9.749	-36.653	0.0117	-0.0035	-0.0005	-0.0040	0.0116	4
BABR	-12.150	-44.995	0.0124	-0.0039	-0.0009	-0.0046	0.0121	4
BAIL	-14.797	-39.172	0.0120	-0.0035	0.0002	-0.0046	0.0116	4
BAIR	-11.306	-41.859	0.0121	-0.0036	-0.0007	-0.0043	0.0119	4
BAIT	-12.521	-40.289	0.0120	-0.0035	-0.0003	-0.0044	0.0117	4
BATF	-17.555	-39.743	0.0122	-0.0037	0.0005	-0.0052	0.0116	4
BAVC	-14.888	-40.803	0.0122	-0.0036	0.0000	-0.0048	0.0118	4
CEFT	-3.711	-38.473	0.0118	-0.0036	-0.0016	-0.0033	0.0118	3
CESE	-3.681	-40.337	0.0117	-0.0036	-0.0017	-0.0032	0.0117	4
CRAT	-7.238	-39.416	0.0117	-0.0032	-0.0009	-0.0034	0.0116	4
IMPZ	-5.492	-47.497	0.0119	-0.0041	-0.0023	-0.0036	0.0119	4
MABB	-4.241	-44.816	0.0119	-0.0039	-0.0021	-0.0034	0.0119	4
MABS	-7.534	-46.040	0.0120	-0.0039	-0.0017	-0.0038	0.0119	4
PBCG	-7.214	-35.907	0.0115	-0.0033	-0.0007	-0.0035	0.0114	4
PBJP	-7.136	-34.873	0.0115	-0.0032	-0.0006	-0.0034	0.0114	2
PEAF	-7.764	-37.632	0.0117	-0.0034	-0.0008	-0.0036	0.0116	4
PEPE	-9.384	-40.506	0.0119	-0.0036	-0.0008	-0.0040	0.0118	4
PICR	-10.430	-45.173	0.0122	-0.0038	-0.0011	-0.0042	0.0120	4
PIFL	-6.788	-43.041	0.0119	-0.0037	-0.0015	-0.0036	0.0118	4
PISR	-9.031	-42.703	0.0120	-0.0037	-0.0011	-0.0040	0.0119	4
PITN	-5.102	-42.793	0.0118	-0.0037	-0.0017	-0.0034	0.0117	4
RECF	-8.051	-34.952	0.0117	-0.0031	-0.0004	-0.0035	0.0116	2
RNMO	-5.204	-37.325	0.0117	-0.0035	-0.0013	-0.0034	0.0117	4
RNNA	-5.836	-35.208	0.0114	-0.0033	-0.0010	-0.0034	0.0113	4
RNPF	-6.132	-38.207	0.0117	-0.0033	-0.0011	-0.0034	0.0116	4
SALU	-2.593	-44.212	0.0118	-0.0038	-0.0023	-0.0031	0.0118	4
SPBO	-22.852	-48.432	0.0118	-0.0030	0.0008	-0.0054	0.0109	4
SPFE	-20.263	-50.229	0.0118	-0.0030	0.0003	-0.0050	0.0111	4
SPFR	-20.511	-47.387	0.0115	-0.0032	0.0004	-0.0052	0.0108	4
SPJA	-21.241	-48.287	0.0117	-0.0031	0.0005	-0.0052	0.0109	4
SPPI	-22.703	-47.624	0.0117	-0.0031	0.0007	-0.0054	0.0108	4
SPTU	-21.929	-50.492	0.0119	-0.0027	0.0007	-0.0052	0.0110	4
UBAL	-23.500	-45.119	0.0116	-0.0034	0.0009	-0.0057	0.0106	3
VICO	-20.762	-42.870	0.0123	-0.0036	0.0008	-0.0056	0.0115	4
IFSC	-27.594	-48.542	0.0120	-0.0027	0.0017	-0.0059	0.0106	4
POAL	-30.074	-51.120	0.0122	-0.0019	0.0023	-0.0060	0.0106	4
PRCV	-24.963	-53.466	0.0125	-0.0020	0.0015	-0.0054	0.0113	4
PRGU	-25.384	-51.488	0.0121	-0.0024	0.0014	-0.0055	0.0109	4
PRMA	-23.410	-51.938	0.0121	-0.0025	0.0010	-0.0053	0.0111	4
RSAL	-29.789	-55.769	0.0120	-0.0013	0.0022	-0.0057	0.0104	4
RSCL	-28.142	-54.755	0.0122	-0.0017	0.0019	-0.0057	0.0107	4
RSPE	-31.802	-52.418	0.0119	-0.0020	0.0023	-0.0062	0.0101	4
SCAQ	-26.394	-48.737	0.0120	-0.0029	0.0014	-0.0059	0.0107	4
SCCH	-27.138	-52.600	0.0122	-0.0021	0.0017	-0.0057	0.0109	4
SCLA	-27.793	-50.304	0.0121	-0.0024	0.0017	-0.0059	0.0107	4
SMAR	-29.719	-53.717	0.0122	-0.0019	0.0021	-0.0060	0.0106	4
UFPR	-25.448	-49.231	0.0120	-0.0029	0.0012	-0.0058	0.0108	4

APÊNDICE 03: Histogramas de frequências das precisões planimétricas e altimétricas.



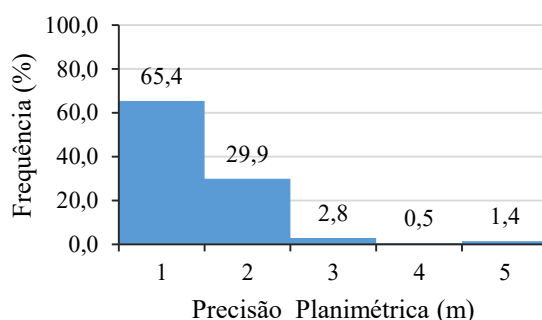
<b>GPT com GMF<sub>Dry+Wet</sub></b>			
Precisão Planimétrica (m)		Frequência	
		Unidades	(%)
1	≤ 0,0015	3474	65,1
2	> 0,0015 e ≤ 0,002	1609	30,1
3	> 0,002 e ≤ 0,0025	155	2,9
4	> 0,0025 e ≤ 0,003	24	0,4
5	> 0,003 e ≤ 0,010	78	1,5
<b>Total:</b>		5340	100

**Histograma da precisão planimétrica**



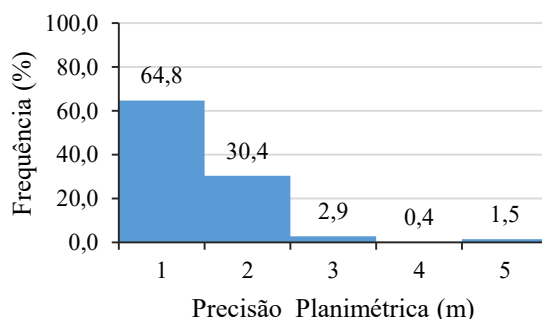
<b>ECMWF com VMF1<sub>Dry+Wet</sub></b>			
Precisão Planimétrica (m)		Frequência	
		Unidades	(%)
1	≤ 0,0015	3491	65,4
2	> 0,0015 e ≤ 0,002	1594	29,9
3	> 0,002 e ≤ 0,0025	152	2,8
4	> 0,0025 e ≤ 0,003	27	0,5
5	> 0,003 e ≤ 0,010	76	1,4
<b>Total:</b>		5340	100

**Histograma da precisão planimétrica**



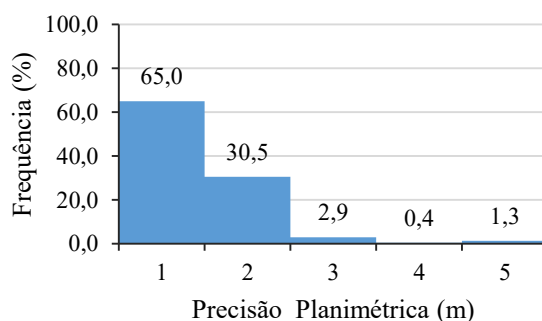
<b>Saastamoinen<sub>Dry</sub> com NMF<sub>Dry</sub></b>			
Precisão Planimétrica (m)		Frequência	
		Unidades	(%)
1	≤ 0,0015	3460	64,8
2	> 0,0015 e ≤ 0,002	1626	30,4
3	> 0,002 e ≤ 0,0025	153	2,9
4	> 0,0025 e ≤ 0,003	22	0,4
5	> 0,003 e ≤ 0,009	79	1,5
<b>Total:</b>		5340	100

**Histograma da precisão planimétrica**



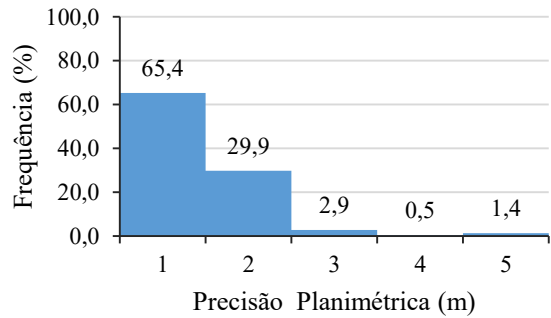
<b>GPT<sub>Dry</sub> com GMF<sub>Dry</sub></b>			
Precisão Planimétrica (m)		Frequência	
		Unidades	(%)
1	≤ 0,0015	3471	65,0
2	> 0,0015 e ≤ 0,002	1627	30,5
3	> 0,002 e ≤ 0,0025	153	2,9
4	> 0,0025 e ≤ 0,003	21	0,4
5	> 0,003 e ≤ 0,010	68	1,3
<b>Total:</b>		5340	100

**Histograma da precisão planimétrica**



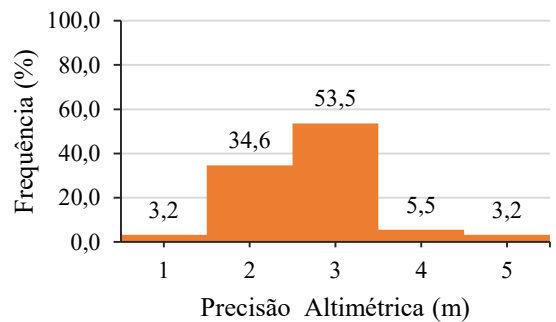
ECMWF <sub>Dry</sub> com VMF1 <sub>Dry</sub>			
Precisão Planimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	%	
1	≤ 0,0015	3492	65,4
2	> 0,0015 e ≤ 0,002	1594	29,9
3	> 0,002 e ≤ 0,0025	153	2,9
4	> 0,0025 e ≤ 0,003	25	0,5
5	> 0,003 e ≤ 0,010	76	1,4
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da precisão planimétrica



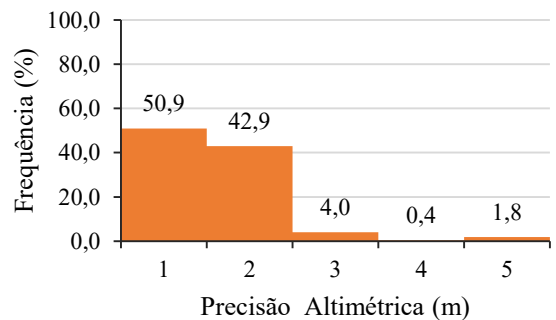
Parcialmente sem correção			
Precisão Altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	%	
1	≤ 0,0015	171	3,2
2	> 0,0015 e ≤ 0,002	1846	34,6
3	> 0,002 e ≤ 0,0025	2858	53,5
4	> 0,0025 e ≤ 0,003	293	5,5
5	> 0,003 e ≤ 0,024	172	3,2
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da precisão altimétrica



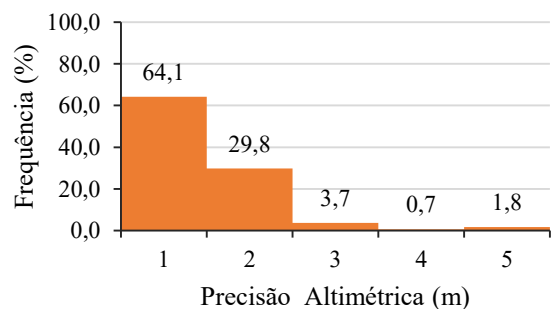
Saastamoinen			
Precisão Altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	%	
1	≤ 0,0015	2720	50,9
2	> 0,0015 e ≤ 0,002	2291	42,9
3	> 0,002 e ≤ 0,0025	211	4,0
4	> 0,0025 e ≤ 0,003	21	0,4
5	> 0,003 e ≤ 0,028	97	1,8
<b>Total:</b>		5340	100

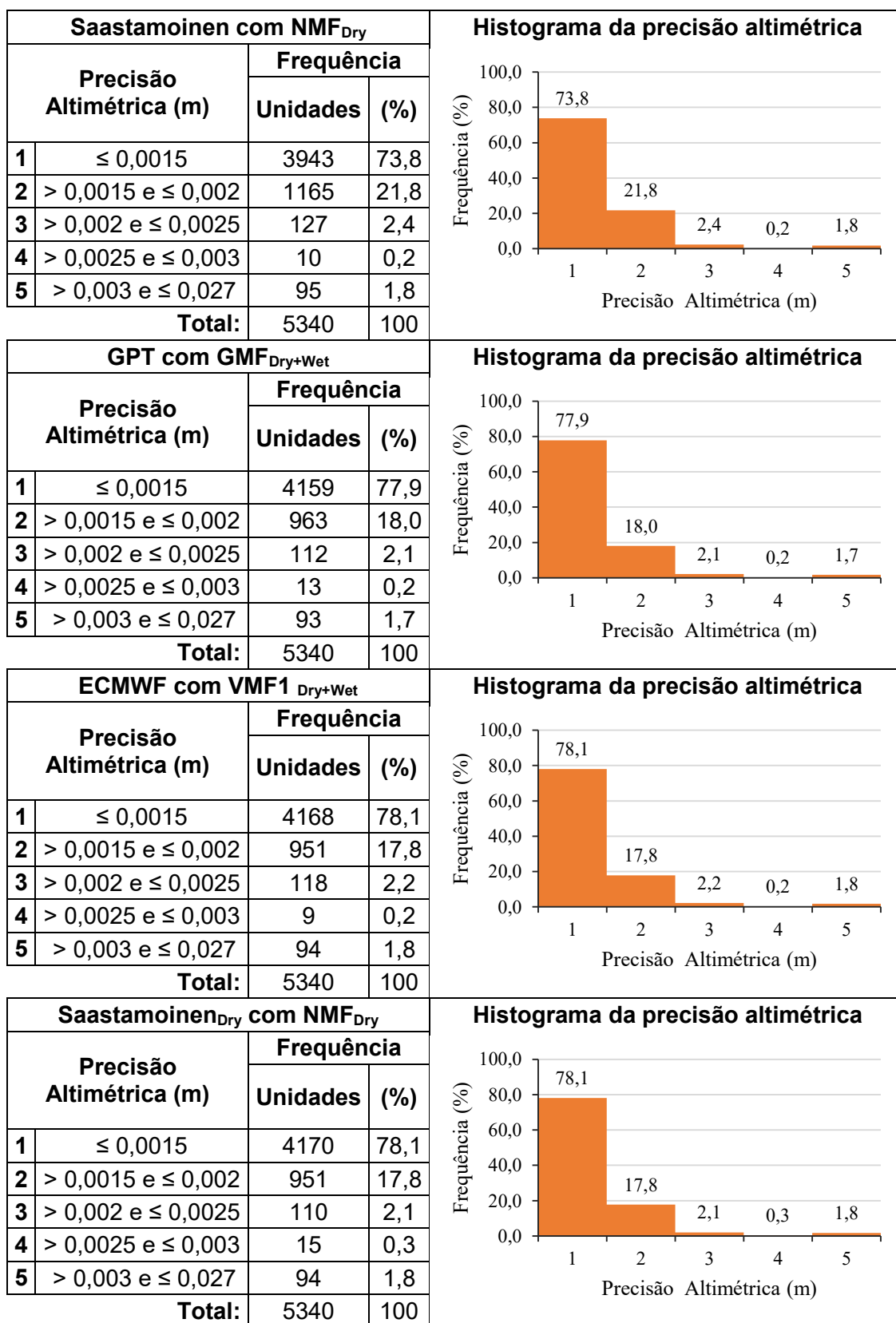
Histograma da precisão altimétrica



Hopfield			
Precisão Altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	%	
1	≤ 0,0015	3423	64,1
2	> 0,0015 e ≤ 0,002	1589	29,8
3	> 0,002 e ≤ 0,0025	196	3,7
4	> 0,0025 e ≤ 0,003	38	0,7
5	> 0,003 e ≤ 0,027	94	1,8
<b>Total:</b>		5340	100

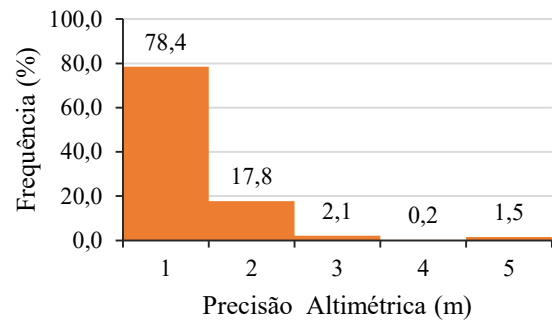
Histograma da precisão altimétrica





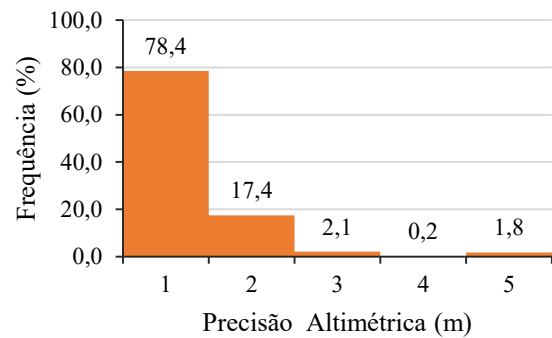
<b>GPT<sub>Dry</sub> com GMF<sub>Dry</sub></b>			
	<b>Precisão Altimétrica (m)</b>	<b>Frequência</b>	
		<b>Unidades</b>	<b>(%)</b>
<b>1</b>	$\leq 0,0015$	4189	78,4
<b>2</b>	$> 0,0015$ e $\leq 0,002$	948	17,8
<b>3</b>	$> 0,002$ e $\leq 0,0025$	110	2,1
<b>4</b>	$> 0,0025$ e $\leq 0,003$	11	0,2
<b>5</b>	$> 0,003$ e $\leq 0,027$	82	1,5
<b>Total:</b>		5340	100

**Histograma da precisão altimétrica**

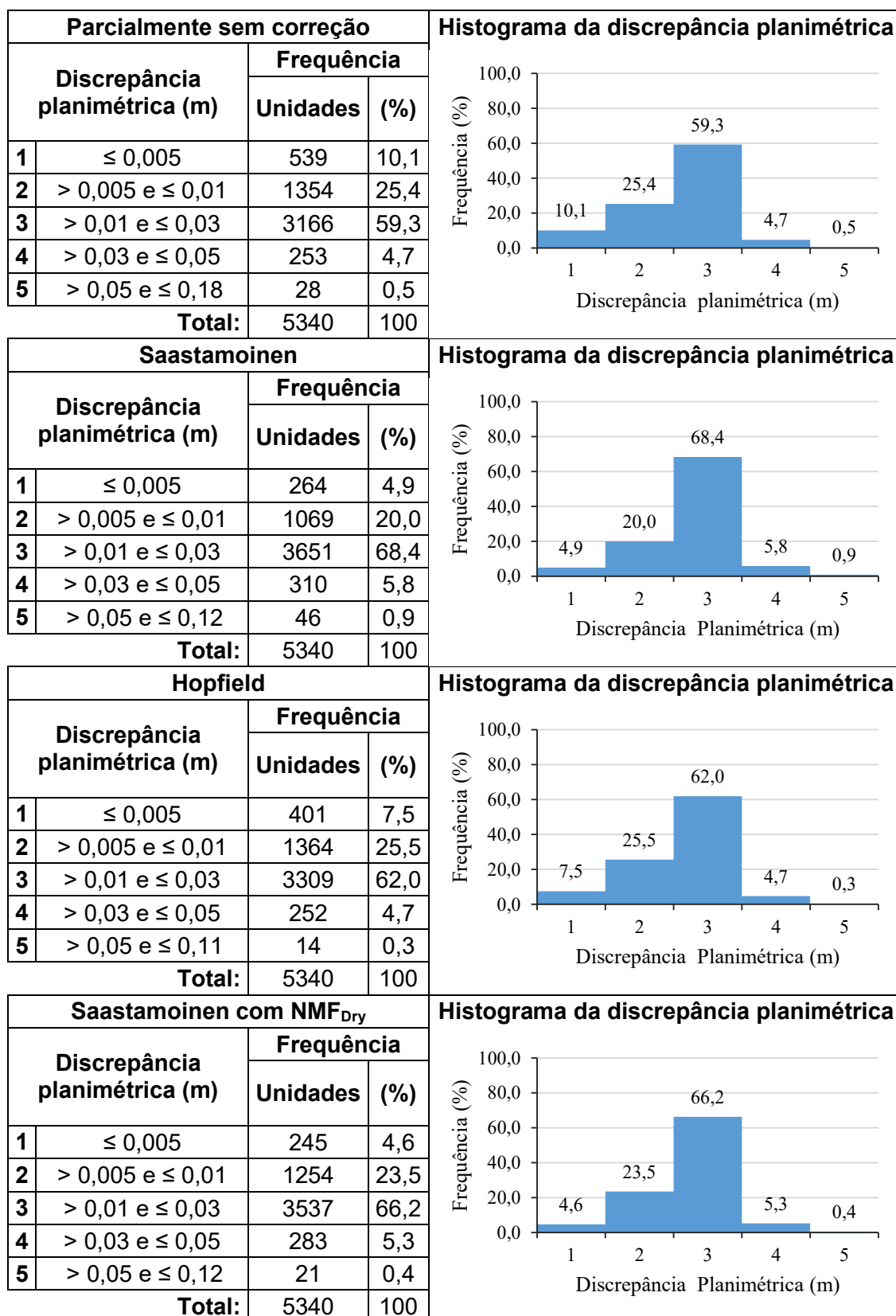


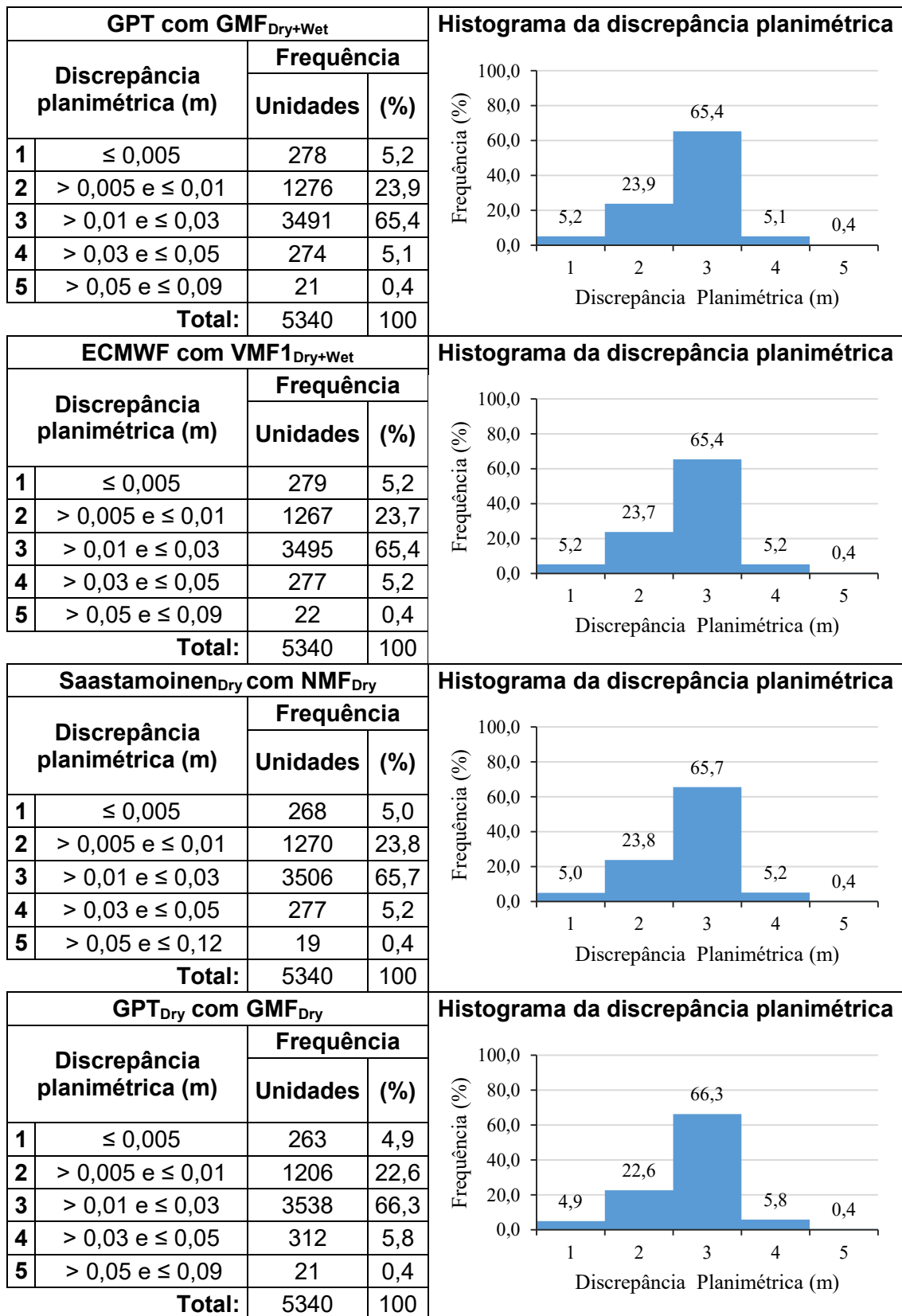
<b>ECMWF<sub>Dry</sub> com VMF1<sub>Dry</sub></b>			
	<b>Precisão Altimétrica (m)</b>	<b>Frequência</b>	
		<b>Unidades</b>	<b>(%)</b>
<b>1</b>	$\leq 0,0015$	4189	78,4
<b>2</b>	$> 0,0015$ e $\leq 0,002$	931	17,4
<b>3</b>	$> 0,002$ e $\leq 0,0025$	114	2,1
<b>4</b>	$> 0,0025$ e $\leq 0,003$	11	0,2
<b>5</b>	$> 0,003$ e $\leq 0,027$	95	1,8
<b>Total:</b>		5340	100

**Histograma da precisão altimétrica**



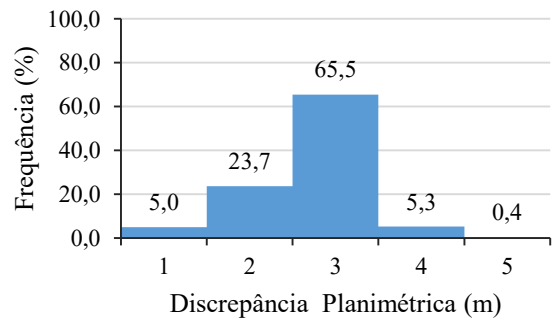
APÊNDICE 04: Histogramas de frequências das discrepâncias planimétricas e altimétricas.





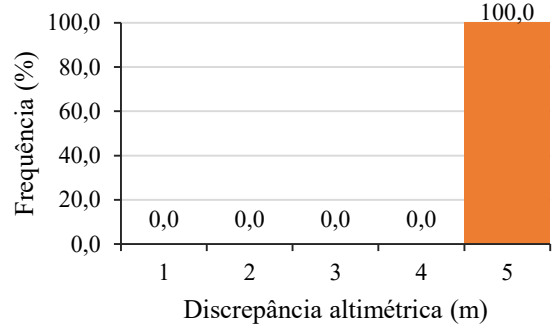
ECMWF <sub>Dry</sub> com VMF1 <sub>Dry</sub>			
Discrepância planimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	(%)	
1	≤ 0,005	269	5,0
2	> 0,005 e ≤ 0,01	1268	23,7
3	> 0,01 e ≤ 0,03	3499	65,5
4	> 0,03 e ≤ 0,05	282	5,3
5	> 0,05 e ≤ 0,09	22	0,4
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da discrepância planimétrica



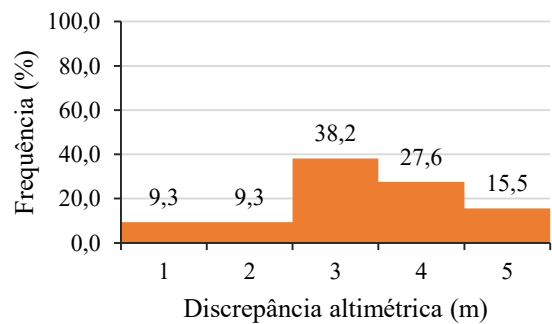
Parcialmente sem correção			
Discrepância altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	(%)	
1	≤ 0,005	0	0,0
2	> 0,005 e ≤ 0,01	0	0,0
3	> 0,01 e ≤ 0,03	0	0,0
4	> 0,03 e ≤ 0,05	0	0,0
5	> 0,05 e ≤ 0,38	5340	100
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da discrepância altimétrica



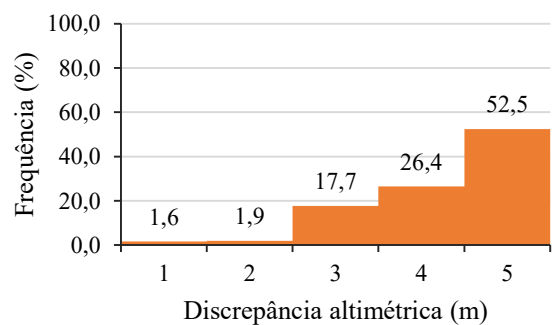
Saastamoinen			
Discrepância altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	(%)	
1	≤ 0,005	499	9,3
2	> 0,005 e ≤ 0,01	497	9,3
3	> 0,01 e ≤ 0,03	2039	38,2
4	> 0,03 e ≤ 0,05	1475	27,6
5	> 0,05 e ≤ 0,27	830	15,5
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da discrepância altimétrica



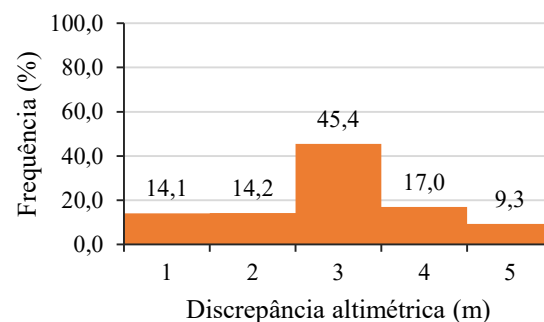
Hopfield			
Discrepância altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	(%)	
1	≤ 0,005	86	1,6
2	> 0,005 e ≤ 0,01	99	1,9
3	> 0,01 e ≤ 0,03	943	17,7
4	> 0,03 e ≤ 0,05	1411	26,4
5	> 0,05 e ≤ 0,22	2801	52,5
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da discrepância altimétrica



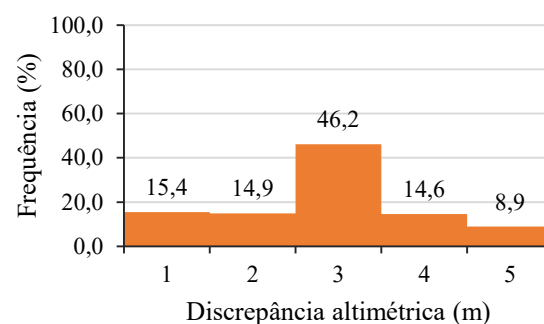
Saastamoinen com NMF <sub>Dry</sub>			
Discrepância altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	(%)	
1	≤ 0,005	755	14,1
2	> 0,005 e ≤ 0,01	758	14,2
3	> 0,01 e ≤ 0,03	2425	45,4
4	> 0,03 e ≤ 0,05	906	17,0
5	> 0,05 e ≤ 0,15	496	9,3
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da discrepância altimétrica



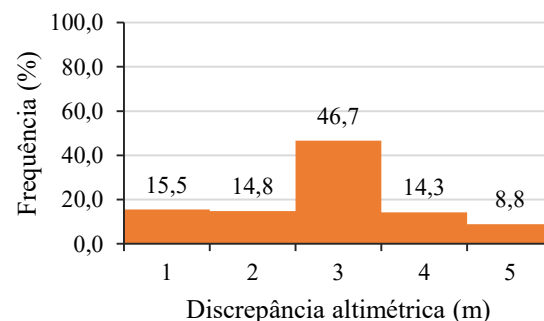
GPT com GMF <sub>Dry+Wet</sub>			
Discrepância altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	(%)	
1	≤ 0,005	824	15,4
2	> 0,005 e ≤ 0,01	795	14,9
3	> 0,01 e ≤ 0,03	2467	46,2
4	> 0,03 e ≤ 0,05	778	14,6
5	> 0,05 e ≤ 0,16	476	8,9
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da discrepância altimétrica



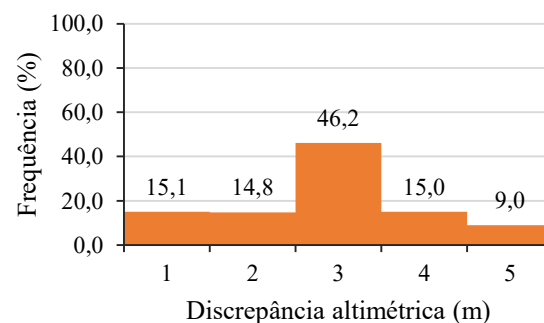
ECMWF com VMF1 <sub>Dry+Wet</sub>			
Discrepância altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	(%)	
1	≤ 0,005	826	15,5
2	> 0,005 e ≤ 0,01	788	14,8
3	> 0,01 e ≤ 0,03	2493	46,7
4	> 0,03 e ≤ 0,05	761	14,3
5	> 0,05 e ≤ 0,16	472	8,8
<b>Total:</b>		5340	100

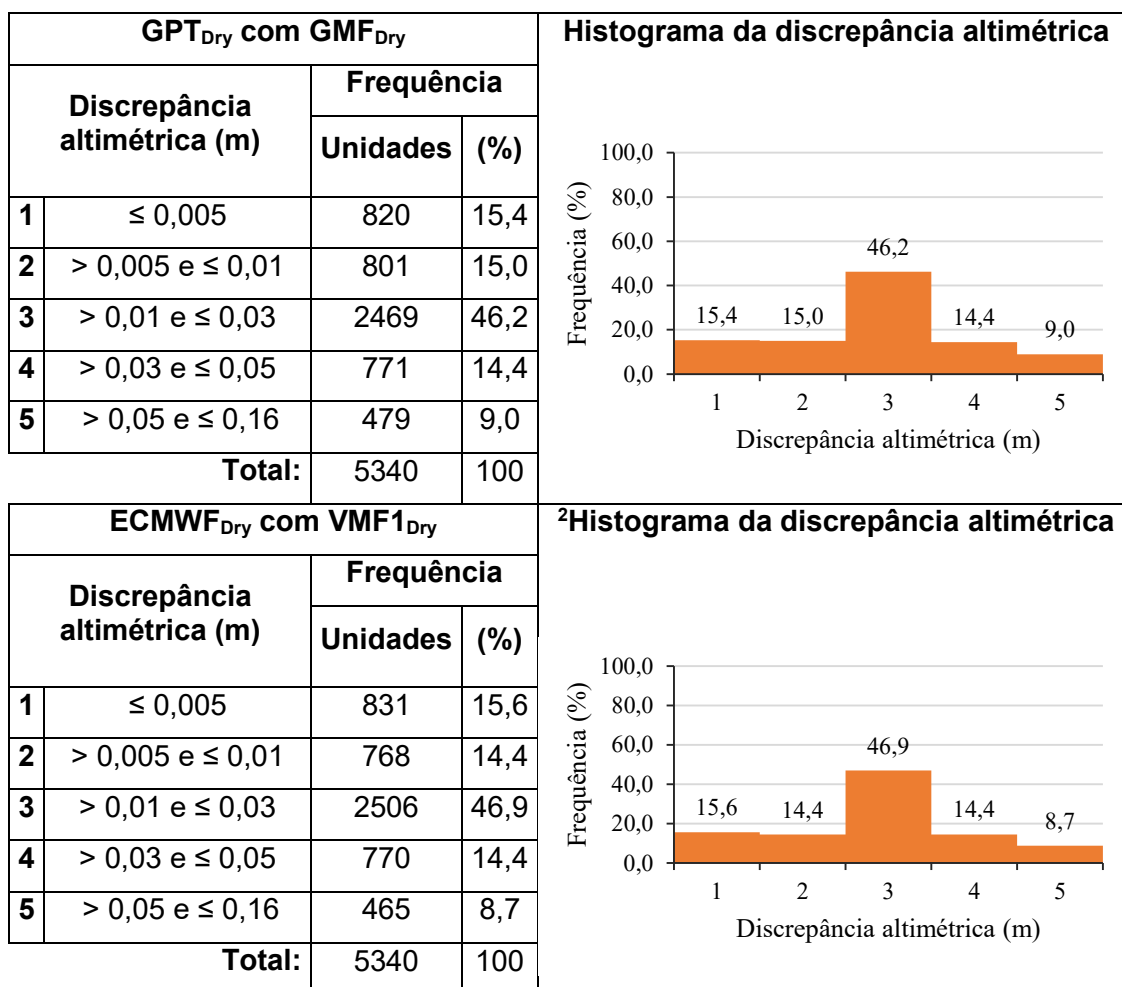
Histograma da discrepância altimétrica



Saastamoinen <sub>Dry</sub> com NMF <sub>Dry</sub>			
Discrepância altimétrica (m)	Frequência		
	Unidades	(%)	
1	≤ 0,005	805	15,1
2	> 0,005 e ≤ 0,01	790	14,8
3	> 0,01 e ≤ 0,03	2465	46,2
4	> 0,03 e ≤ 0,05	800	15,0
5	> 0,05 e ≤ 0,16	480	9,0
<b>Total:</b>		5340	100

Histograma da discrepância altimétrica





<sup>2</sup> Foi utilizado a função absoluto nas discrepâncias altimétricas, de modo a evitar valores negativos nos histogramas de frequências.