

O IMPACTO DOS MODELOS TROPOSFÉRICOS NO POSICIONAMENTO GNSS DE ALTA PRECISÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS E ESTAÇÕES DO ANO

Maria Lígia Chuerubim (Universidade Federal de Uberlândia/ Universidade de São Paulo – EESC) E-mail: marialigia@ufu.br

Paulo Cesar Lima Segantine (Universidade de São Paulo – EESC) E-mail: seganta@sc.usp.br

Irineu da Silva (Universidade de São Paulo – EESC) E-mail: irineu@sc.usp.br

Resumo: Esta pesquisa fornece detalhes do processamento e ajustamento de um experimento com dados *Global Navigation Satellite System* (GNSS) das estações Coari, Cruzeiro do Sul, São Luís, Natal, Cuiabá, Brasília, Vitória, Chapecó, Curitiba e Porto Alegre, pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), selecionados em diferentes épocas, estações do ano e localizações geográficas, com o intuito de investigar o impacto dos modelos empíricos globais da Troposfera como Hopfield e Saastamoinen no posicionamento geodésico de alta precisão. Os resultados mostraram que não há diferenças estatísticas significativas no desempenho desses dois modelos. Similarmente, os resultados indicam uma correlação significativa entre ambos os modelos para diferentes localidades, estações do ano, comprimentos de linhas de base e máscaras de elevação. Em geral, para o período analisado, o Modelo de Saastamoinen apresentou para o verão uma melhora significativa em planimetria, enquanto que o modelo de Hopfield apresentou melhoras significativas em altimetria para os dados analisados na primavera, outono e inverno. Todavia, como o período de dados foi extremamente curto não se pode afirmar qual modelo é ideal para o Brasil, pois os mesmos não consideram efeitos locais nas estações, o que tornaria os resultados mais realistas.

Palavras-chave: GNSS, atraso zenital troposférico, Saastamoinen e Hopfield.

1. INTRODUÇÃO

Quando os sinais de satélite do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) são transmitidos através da atmosfera, os mesmos sofrem a influência de inúmeros erros dentre os quais se destacam o erro inerente à troposfera. Este erro no posicionamento via satélites artificiais é determinado em função das condições meteorológicas como pressão, temperatura e umidade, existentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal desde o satélite transmissor até a antena receptora. Este efeito é conhecido como atraso zenital troposférico (*Zenith Tropospheric Delay - ZTD*).

A troposfera localiza-se entre as baixas camadas da atmosfera entre 9 km, na região dos polos, e 16 km sobre o equador, sendo considerado um meio não dispersivo, afetando os sinais GNSS L1 e L2 de formas similares. Esta região tem um índice de refração que varia com a altitude e o ângulo de elevação dos satélites e, em virtude da alta variação de vapor de água nesta camada, estes fatores degradam a precisão dos dados GNSS nesta região, uma vez que altera a trajetória efetivamente percorrida pelas ondas de rádio GNSS, o que provoca uma maior distância percorrida pelo sinal, ou seja, o atraso do sinal e, conseqüentemente, um erro na estimativa das coordenadas dos pontos localizados na superfície terrestre.

Este efeito não depende da frequência do sinal, como é o caso da ionosfera, e não pode ser eliminado por meio de combinações lineares entre as frequências L1 e L2. O atraso troposférico é geralmente tratado pela soma de dois componentes: a componente hidrostática, também conhecida como parte seca, e a componente úmida ou parte molhada (MENDES e LANGLEY, 1998).

O atraso troposférico nos sinais de ondas de rádio GNSS pode variar de 2 m, na direção zenital, a 20 m para ângulos abaixo de 10°. A fim de reduzir os efeitos da

troposfera, são utilizados modelos globais, derivados experimentalmente de dados de radiossondas, dentre os quais se destacam os modelos empíricos de Hopfield e Saastamoinen.

As condições atmosféricas globais usadas como constantes nesses modelos fornecem uma ampla aproximação das condições atmosféricas, mas ignoram as condições atmosféricas reais em uma dada localização e não levam em conta as variações sazonais da atmosfera com a variação da latitude. Além disso, a variação diária de temperatura, pressão e umidade relativa do ar pode levar a erros na estimativa dos atrasos troposféricos obtidos utilizando os modelos globais da troposfera, especialmente, nas componentes altimétricas das estações, que se tornam mais discrepantes com o aumento do comprimento da linha de base calculado.

Estimativas de alta precisão, realizadas por meio de observações coletadas via posicionamento GNSS utilizando diferentes *softwares* e estratégias de processamento, permitem a utilização de modelos de atrasos troposféricos globais empíricos como os modelos de Hopfield e Saastamoinen, bem como a aplicação de combinações lineares ionosféricas como a *ion-free*. As coordenadas estimadas de um ponto localizado na superfície terrestre podem se repetir quando o atraso troposférico é calculado em tempo real a partir de um modelo de Predição Numérica de Tempo (NWP - *Numerical Weather Prediction*).

Ensaaios mostram que o impacto do atraso troposférico pode acarretar erros da ordem de 0,76 mm a 28,01 mm, para as componentes horizontais das estações, e erros da ordem de 0,419 mm a 17,2 mm, para a componente altimétrica, sugerindo que o efeito da refração troposférica é maior para a componente altimétrica das estações.

Neste contexto, este trabalho tem por finalidade estimar as coordenadas de estações da RBMC localizadas em diferentes regiões do país em distintas épocas e estações do ano, aplicando-se diferentes estratégias de processamento, com o intuito de avaliar o impacto dos modelos globais troposféricos Hopfield e Saastamoinen na determinação das componentes horizontais e verticais das estações, com diferentes máscaras de elevação, visando identificar e correlacionar possíveis efeitos sazonais e locais nas regiões de estudo.

2. MODELAGEM DO ATRASO TROPOSFÉRICO

De forma geral, os modelos que estimam o atraso troposférico entre a antena de um receptor (r) e um satélite (s) têm a seguinte forma:

$$T_r^s = 10^{-6} \int N_T ds \quad (1)$$

Onde,

T_r^s - atraso troposférico total entre o satélite (s) e o receptor (r)

N_T - refratividade da troposfera

A integral ao longo do caminho percorrido pelo sinal é solucionada quando se conhece o valor de N_T (KLEIJER, 2004).

Cada uma das componentes da equação (1) é expressa como o produto do atraso zenital com uma função de mapeamento, que relaciona o atraso vertical para diferentes ângulos de elevação (e). De forma simplificada, a equação (1) pode ser escrita como (NIEEL, 1996):

$$T_r^s(e) = T_h^z \cdot mf_h(e) + T_w^z \cdot mf_w(e), \quad (2)$$

Onde,

e - ângulo de elevação

$T_s^r(e)$ - atraso troposférico total para um ângulo de elevação (e) entre o satélite (s) e o receptor (r)

T_h^z e T_w^z - atraso troposférico total na direção zenital (z), respectivamente, para as componentes hidrostática (h) e úmida (w)

mf_h e mf_w - funções de mapeamento, respectivamente, para as componentes hidrostática (h) e para a componente úmida (w), obtidas em função do ângulo de elevação (e)

2.1 Modelos empíricos da troposfera

O modelo de Hopfield assume o mesmo modelo funcional para as componentes seca e úmida do atraso troposféricos (SEEBER, 2003), conforme indicado a seguir:

$$\begin{aligned} T_r^s(e) &= T_h^z \cdot mf_h(e) + T_w^z \cdot mf_w(e) \\ T_h^z &= 155,2 \cdot 10^{-7} \frac{P}{T} H_d \\ T_w^z &= 155,2 \cdot 10^{-7} \frac{4810e}{T^2} H_w \\ mf_h(e) &= (\text{sen}(e^2 + 6,25)^{1/2})^{-1} \\ mf_w(e) &= (\text{sen}(e^2 + 2,25)^{1/2})^{-1} \\ H_d &= 40136 + 148,72(T - 273,16) \\ H_w &= 11000m \end{aligned} \quad (3)$$

Os termos (T_h^z) e (T_w^z) descrevem o efeito total da refração troposférica na direção do zênite e as funções de mapeamento (mf_h) e (mf_w) são dadas em função do ângulo de elevação (e), em graus (SEEBER, 2003).

O modelo Saastamoinen é um dos modelos troposféricos padrões disponíveis para a determinação do atraso troposférico, sendo amplamente utilizado em posicionamentos GNSS de alta precisão. A precisão desse modelo é de cerca de 3 cm em zênite (MENDES e LANGLEY, 1998). O modelo padrão descrito por Saastamoinen, com alguns refinamentos, é descrito por (HOFMANNWELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001; KLEIJER, 2004 e JENSEN, 2002):

$$T_r^s = 0,002277(1 + D) \sec \psi \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 \psi \right] + \partial_R \quad (4)$$

onde (P) e (e) referem-se, respectivamente, a pressão superficial em milibares do ar seco e vapor d'água e (T) à temperatura em graus Kelvin. Os termos (B) e (∂_R) correspondem aos fatores de correção (HOFMANNWELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001) e $\psi = 90^\circ - e$. O valor de (D) é obtido a partir da seguinte equação:

$$D = 0,0026 \cos 2\phi + 0,00028 H, \quad (5)$$

sendo (ϕ) é a latitude do lugar e (H) é a altitude ortométrica em km (MONICO, 2000).

Os valores de pressão (P), temperatura (T), e ângulo de elevação (e) a serem utilizados nestes modelos são, usualmente, calculados para uma atmosfera padrão. Estes valores podem ser obtidos usando as seguintes equações:

$$\begin{aligned}P &= P_r(1 - 0,0000226 \cdot (H - H_r))^{5,225} \\T &= T_r - 0,0065 \cdot (H - H_r) \\H_u &= H_{ur} \cdot e^{-0,000639(H - H_r)}\end{aligned}\quad (6)$$

onde (P_r), (T_r) e (H_{ur}) são, respectivamente, a pressão, a temperatura e a umidade do ar na altura de referência (H_u) (MONICO, 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizados dados GNSS das estações Coari (AMCO Cruzeiro do Sul (CRUZ), São Luís (SALU), Natal (RNNA), Cuiabá (CUIB), Brasília (BRAZ), Vitória (CEFE), Chapecó (SCCH), Curitiba (UFPR) e Porto Alegre (POAL), pertencentes à RBMC do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Além disso, foram utilizadas órbitas precisas GPS e Glonass, bem como os parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores GNSS. Foram inseridos tanto os *offsets* para as portadoras L1 e L2, bem como as variações dos centros de fase de cada modelo da antena receptora GNSS.

Para o processamento dos dados GNSS utilizou-se o software LEICA Geo Office da empresa Leica Geosystems AG versão 5.0.0, que possibilita o processamento e ajustamento dos dados com base em diferentes estratégias. Após o tratamento dos dados verificou-se o erro posicional espacial obtido em função da aplicação das diferentes estratégias de processamento e ajustamento dos dados GNSS.

3.2 Metodologia e Estratégia de Ação

Conforme já citado, a metodologia utilizada visou avaliar o impacto da utilização dos modelos troposféricos Hopfield e Saastamoinen na estimativa das coordenadas das estações que compõem a RBMC, distribuídas em diferentes localidades, com a finalidade de se identificar possíveis efeitos sazonais e locais.

Com este intuito, para o estudo de caso, selecionou-se um dia aleatório, sendo adotado o dia 16 do ano de 2013, cujos dados foram coletados em diferentes épocas e estações do ano: primavera (1 de setembro a 30 de novembro), verão (1 de dezembro a 28 de fevereiro), outono (1 de março a 31 de maio) e inverno (1 de junho a 31 de agosto). Desta forma, foram selecionados no calendário GNSS os dados das seguintes épocas: GPS16 (16/01/13), GPS106 (16/04/13), GPS197 (16/07/13) e GPS289 (16/10/13).

Posteriormente, foram realizados processamentos com diferentes estratégias, ou seja, variando-se as máscaras de elevação (10° e 15°) e a os modelos troposféricos Hopfield e Saastamoinen. No processamento dos dados GNSS adotou-se o método de posicionamento relativo e no ajustamento desses dados foi injuncionada, ou seja, fixada a estação BRAZ.

4. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Na etapa que compreende o processamento dos dados em rede, com o objetivo de gerar superabundância interna, foram processadas 16 linhas de base obtendo-se as diferenças espaciais entre as coordenadas de controle e as estimadas com o modelo de Hopfield, com as máscaras de elevação de 10° e 15°, em diferentes épocas e estações do ano, conforme indicado nas Tabela 1 e 2.

Tabela 1 – Erros posicionais, em metros, estimados com o modelo de Hopfield com a máscara de elevação de 10°.

Estação	Primavera			Verão			Outono			Inverno		
	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh
AMCO	0,074	0,065	0,062	0,039	0,041	0,057	0,034	0,041	0,022	0,032	0,410	0,091
CEFE	0,015	0,021	0,034	0,020	0,025	0,041	0,015	0,033	0,018	0,007	0,019	0,045
CRUZ	0,027	0,098	0,096	0,030	0,016	0,021	0,021	0,033	0,021	0,018	0,042	0,021
CUIB	0,004	0,023	0,088	0,001	0,048	0,075	0,002	0,017	0,085	0,002	0,018	0,037
POAL	0,039	0,008	0,093	0,052	0,004	0,017	0,044	0,004	0,017	0,026	0,004	0,015
RNNA	0,031	0,050	0,091	0,000	0,000	0,000	0,037	0,032	0,074	0,026	0,019	0,015
SALU	0,044	0,044	0,093	0,046	0,017	0,021	0,048	0,017	0,016	0,034	0,024	0,049
SCCH	0,031	0,008	0,010	0,044	0,030	0,062	0,035	0,005	0,020	0,021	0,013	0,017
UFPR	0,029	0,006	0,073	0,038	0,009	0,045	0,031	0,009	0,017	0,017	0,001	0,012

Tabela 2 – Erros posicionais, em metros, estimados com o modelo de Hopfield com a máscara de elevação de 15°.

Estação	Primavera (GPS289)			Verão (GPS16)			Outono (GPS106)			Inverno (GPS197)		
	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh
AMCO	0,064	0,054	0,071	0,046	0,086	0,051	0,036	0,026	0,091	0,026	0,019	0,021
CEFE	0,013	0,022	0,023	0,012	0,037	0,099	0,013	0,031	0,017	0,008	0,019	0,038
CRUZ	0,002	0,033	0,082	0,035	0,012	0,010	0,022	0,031	0,021	0,018	0,039	0,073
CUIB	0,004	0,025	0,089	0,006	0,035	0,076	0,003	0,019	0,065	0,002	0,016	0,039
POAL	0,039	0,008	0,095	0,043	0,004	0,019	0,041	0,004	0,015	0,026	0,002	0,020
RNNA	0,030	0,052	0,097	0,032	0,053	0,017	0,036	0,035	0,066	0,025	0,022	0,021
SALU	0,043	0,042	0,091	0,052	0,002	0,066	0,048	0,018	0,005	0,034	0,025	0,035
SCCH	0,032	0,011	0,015	0,035	0,010	0,023	0,035	0,002	0,019	0,021	0,007	0,021
UFPR	0,028	0,002	0,050	0,031	0,002	0,096	0,029	0,008	0,016	0,018	0,001	0,017

A Tabela 1 apresenta os erros posicionais espaciais estimados para as coordenadas das estações aplicando-se o modelo de Hopfield com máscara de elevação de 10°, os quais variaram de 0 mm a 10 cm. É possível identificar por meio destes resultados que os maiores erros em latitude foram de ordem centimétrica, apresentando os piores resultados para as estações AMCO com 7 cm na primavera, POAL com 5 cm no verão e SALU com 5 cm e 3 cm, respectivamente, no outono e no inverno. Em contrapartida, os melhores resultados foram detectados para as estações CUIB na primavera com 4 mm, RNNA no verão com 0 mm e CUIB com 2 mm tanto no outono como no inverno.

Em longitude as componentes estimadas com o modelo de Hopfield com 10° de elevação resultaram em erros da ordem de 10 cm e 4 cm na primavera e no inverno para a estação CRUZ, de 5 cm para a estação CUIB no verão e de 4 cm para AMCO no outono. Os menores erros foram detectados para as estações UFPR na primavera (6 mm), RNNA no verão (0 mm), POAL no outono (4 mm) e UFPR no inverno (1 mm). Já em altimetria, verifica-se que o modelo de Hopfield (10°) apresentou magnitude de, aproximadamente,

10 cm para as estações RNNA (primavera), CEFE (verão) e AMCO (Outono) e de 7cm para a estação CRUZ (inverno). Os menores erros posicionais foram de 1 cm para as estações SCCH (primavera) e CRUZ (verão), de 5 mm para SALU (Outono) e de 2 cm para UFPR.

A análise da Tabela 2 indica que os erros posicionais atingiram valores que variaram de 1 mm a 10 cm, aproximadamente, para o modelo de Hopfield com uma máscara de 15° de elevação. Em latitude os erros variam de 3 cm a 6 cm, apresentando maiores magnitudes para as estações AMCO na primavera com um erro de 6 cm e para a estação SALU no verão com um erro de 5 cm, enquanto que os menores erros foram observados para a estação CRUZ na primavera (2 mm) e, principalmente, para a estação CUIB no verão, outono e inverno, cujos erros foram iguais a 6 mm, 3 mm e 2 mm, respectivamente.

Em longitude, os maiores erros posicionais detectados com o modelo de Hopfield (10°) foram iguais a 5 cm e 9 cm para a estação AMCO, respectivamente, na primavera e no verão e igual a 3 cm para a estação RNNA e 4 cm para a estação CRUZ, no outono. Enquanto que os menores erros foram observados para a estação UFPR com 2 mm, 2 mm e 1mm, respectivamente, para a primavera, verão e inverno, e de 2 mm para SCCH no outono. Em altimetria, os maiores erros posicionais detectados foram observados para as estações RNNA (primavera), CEFE (verão), com erros de 10 cm, bem como para as estações AMCO (outono) e CRUZ (inverno), com erros, respectivamente, de 9 cm e 7 cm.

As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, os erros espaciais posicionais obtidos com a aplicação do modelo troposférico de Saastamoinen para máscaras de elevação de 10° e 15°, em diferentes épocas e estações do ano.

Tabela 3 – Erros posicionais, em metros, estimados com o modelo de Saastamoinen com a máscara de elevação de 10°.

Estação	Primavera (GPS289)			Verão (GPS16)			Outono (GPS106)			Inverno (GPS197)		
	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh
AMCO	0,035	0,021	0,016	0,042	0,043	0,071	0,037	0,033	0,020	0,026	0,019	0,021
CEFE	0,013	0,025	0,027	0,011	0,034	0,030	0,013	0,032	0,018	0,008	0,019	0,038
CRUZ	0,021	0,063	0,020	0,034	0,032	0,028	0,023	0,024	0,030	0,018	0,039	0,073
CUIB	0,003	0,025	0,034	0,006	0,034	0,022	0,003	0,017	0,067	0,002	0,016	0,039
POAL	0,040	0,008	0,015	0,047	0,001	0,020	0,041	0,003	0,015	0,026	0,002	0,020
RNNA	0,035	0,060	0,076	0,031	0,049	0,035	0,035	0,041	0,003	0,032	0,022	0,021
SALU	0,045	0,030	0,088	0,053	0,010	0,033	0,048	0,007	0,003	0,034	0,045	0,064
SCCH	0,033	0,010	0,027	0,039	0,016	0,028	0,034	0,004	0,020	0,021	0,007	0,070
UFPR	0,029	0,004	0,064	0,034	0,001	0,047	0,029	0,009	0,016	0,018	0,001	0,017

Tabela 4 – Erros posicionais, em metros, estimados com o modelo de Saastamoinen com a máscara de elevação de 15°.

Estação	Primavera (GPS289)			Verão (GPS16)			Outono (GPS106)			Inverno		
	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh
AMCO	0,030	0,031	0,026	0,035	0,056	0,040	0,035	0,027	0,021	0,021	0,013	0,016
CEFE	0,014	0,024	0,024	0,018	0,018	0,036	0,015	0,034	0,016	0,008	0,021	0,040
CRUZ	0,076	0,023	0,082	0,028	0,062	0,016	0,021	0,028	0,020	0,014	0,030	0,020
CUIB	0,003	0,025	0,036	0,002	0,056	0,043	0,002	0,018	0,070	0,001	0,016	0,029
POAL	0,040	0,007	0,067	0,054	0,018	0,035	0,043	0,006	0,016	0,025	0,001	0,015
RNNA	0,030	0,049	0,085	0,028	0,049	0,013	0,037	0,034	0,076	0,023	0,023	0,023
SALU	0,042	0,043	0,097	0,052	0,003	0,068	0,048	0,014	0,017	0,031	0,039	0,079
SCCH	0,032	0,011	0,005	0,046	0,038	0,088	0,035	0,005	0,018	0,021	0,006	0,016
UFPR	0,030	0,005	0,055	0,040	0,019	0,060	0,031	0,010	0,015	0,018	0,003	0,012

Por meio da Tabela 3 verifica-se que a aplicação do modelo de Saastamoinen com uma máscara de elevação de 10°, produz erros que variaram entre 1 mm a 9 cm. Para todas as estações do ano, os piores erros em latitude ocorreram para a estação SALU, variando de 3 cm a 5 cm, enquanto que os melhores resultados foram detectados para a estação CUIB, variando de 2 mm a 6 mm. Em longitude, para a primavera, verão e inverno os erros foram maiores para a estação RNNA, atingindo magnitudes de até 6 cm e para a estação SALU, que apresentou no inverno erros de até 4 cm. Os menores erros em longitude variaram de 1 mm (verão, outono) a 4 mm (primavera) para a estação UFPR e de 3 mm (outono) para a estação POAL.

Em altimetria, para o modelo de Saastamoinen (10°), os maiores erros foram de 9 cm para a estação SALU (primavera) e de 7 cm para as estações AMCO (verão), CUIB (outono) e CRUZ (inverno). Os menores erros detectados foram da ordem de 1 cm e 2 cm para a estação POAL, na primavera e no verão, respectivamente, de 3 cm para a estação SALU (outono) e de 2 cm para a estação CRUZ (inverno).

A Tabela 4 apresenta os erros posicionais espaciais estimados com o modelo de Saastamoinen com uma máscara de elevação de 15°, em que se verifica que os erros variam na ordem de 1 mm a 10 cm. Em latitude, os maiores erros foram observados para as estações CRUZ (primavera) e POAL (verão) sendo iguais a 8 cm e 5 cm, respectivamente, enquanto que a estação SALU apresentou os piores erros, que variaram de 3 cm a 5 cm, respectivamente, no inverno e no outono. Os melhores resultados foram apresentados para a estação CUIB no verão, outono e no inverno, com erros variando de 1 mm a 2 mm e para a estação RNNA, que apresentou um erro de 3 mm na primavera.

Em longitude, o modelo de Saastamoinen (15°) resultou nos maiores erros posicionais espaciais para as estações RNNA, que foram de 5 cm e 3 cm, respectivamente, para a primavera e o outono, de 6 cm para a estação CUIB (verão) e de 4 cm para a estação SALU (inverno). Os menores erros foram observados para as estações UFPR (primavera), SALU (verão), SCCH (outono) e POAL (inverno), com erros iguais a 5 mm, 3 mm, 5 mm e 1 mm, respectivamente. Para a componente altimétrica das estações, os maiores erros foram de 10 cm e 8 cm para a estação SALU, respectivamente, na primavera e no inverno, de 9 cm para a estação SCCH (verão) e de 8 cm para a estação RNNA (outono), enquanto que os menos erros foram da ordem de 1 cm para a estação UFPR, tanto no outono quanto no inverno, de 1 cm para a estação RNNA (verão) e de 5 mm para a estação SCCH (primavera).

Para facilitar a interpretação dos resultados, foram gerados gráficos (Figuras 2 a 9) para ilustrar as discrepâncias obtidas entre as soluções estimadas com os modelos de Hopfield e Saastamoinen para distintas épocas e estações no ano de 2013.

As Figuras 1 e 2 ilustram a discrepância espacial posicional obtida entre os modelos troposféricos de Hopfield e Saastamoinen para as máscaras de elevação de 10° e 15° para a primavera:

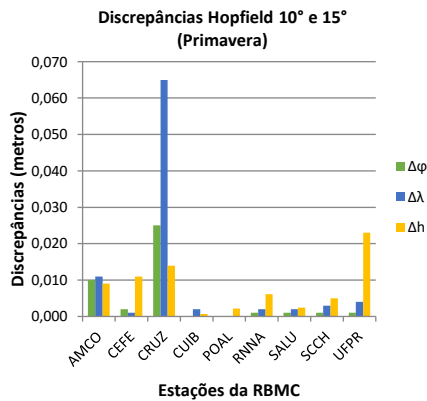


Figura 1 – Discrepâncias do modelo de Hopfield para a primavera (10° e 15°).

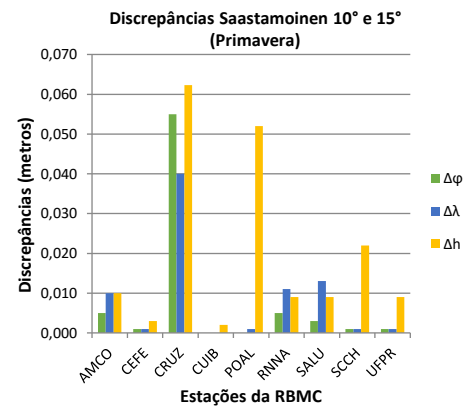


Figura 2 – Discrepâncias do modelo de Saastamoinen para a primavera (10° e 15°).

Verifica-se por meio dos gráficos ilustrados pelas Figuras 1 e 2 que, para a primavera, ambos os modelos apresentaram valores mínimos similares, ou seja, submilimétricos para as máscaras de elevação de 10° e 15°. Por sua vez, pode-se verificar que ocorreram discrepâncias máximas entre ambos os modelos, sendo em planimetria de 2 cm a 6 cm para Hopfield e de 4 cm a 5 cm para Saastamoinen. Em altimetria, os modelos de Hopfield e Saastamoinen apresentaram uma discrepância de 2 cm e de 6 cm, respectivamente.

As Figuras 3 e 4 ilustram a discrepância espacial posicional obtida entre os modelos troposféricos de Hopfield e Saastamoinen para as máscaras de elevação de 10° e 15° para o verão:

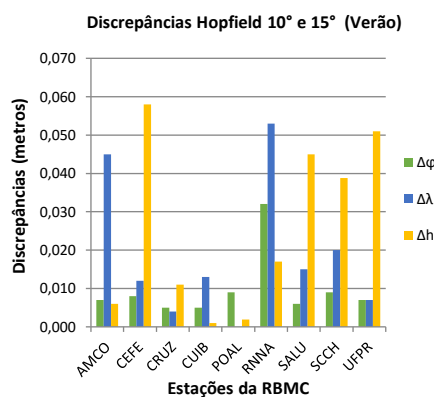


Figura 3 – Discrepâncias do modelo de Hopfield para o verão (10° e 15°).

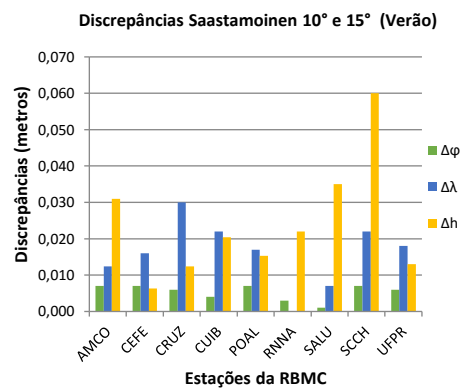


Figura 4 – Discrepâncias do modelo de Saastamoinen para o verão (10° e 15°).

Para o verão, as precisões posicionais estimadas com o modelo de Hopfield para as máscaras de elevação de 10° e 15° resultaram em discrepâncias mínimas de 0 mm a 5 mm em planimetria e de 1 mm em altimetria, enquanto que as discrepâncias máximas foram da ordem de 3 cm a 5 cm em planimetria e de 3 cm a 6 cm em altimetria. Com a

aplicação do modelo de Saastamoinen com máscaras de 10° e 15° verifica-se uma melhora no erro em planimetria, que atinge os valores de 0 mm a 1 mm. Em altimetria ambos os modelos apresentaram a mesma discrepância.

As Figuras 5 e 6 ilustram a discrepância espacial posicional obtida entre os modelos troposféricos de Hopfield e Saastamoinen para as máscaras de elevação de 10° e 15° para o outono:

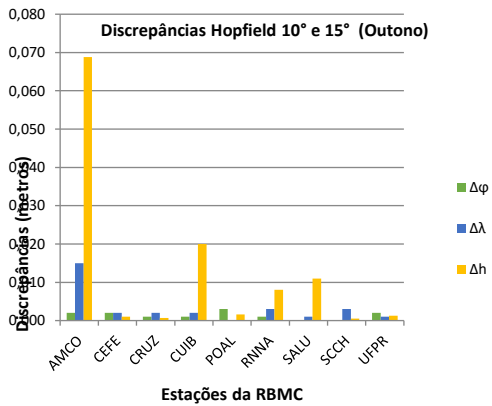


Figura 5 – Discrepâncias do modelo de Hopfield para o outono (10° e 15°).

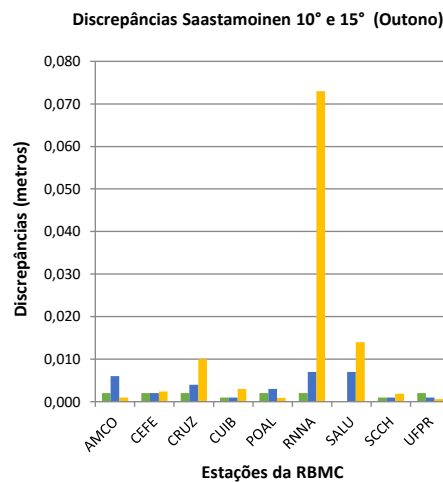


Figura 6 – Discrepâncias do modelo de Saastamoinen para o outono (10° e 15°).

Para o outono não foram observadas melhoras significativas entre ambos os modelos tanto em altimetria quanto em planimetria (0 mm a 1 mm), porém, em altimetria verifica-se que o modelo de Hopfield apresentou um desempenho um pouco superior com discrepâncias que variaram da ordem de 1 cm a 7 cm, enquanto que o modelo de Saastamoinen apresentou discrepâncias de 2 cm a 7 cm.

As Figuras 7 e 8 ilustram a discrepância espacial posicional obtida entre os modelos troposféricos de Hopfield e Saastamoinen para as máscaras de elevação de 10° e 15° para o inverno:

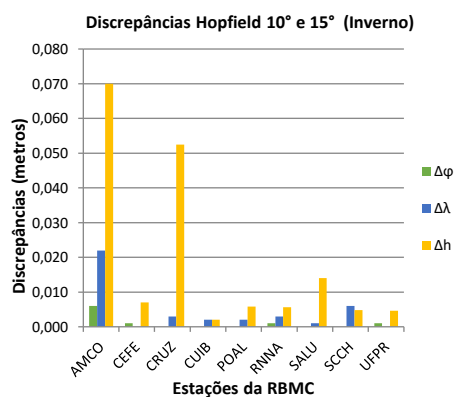


Figura 7 – Discrepâncias do modelo de Hopfield para o inverno (10° e 15°).

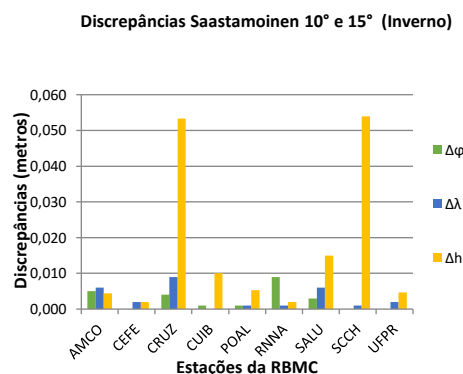


Figura 8 – Discrepâncias do modelo de Saastamoinen para o inverno (10° e 15°).

Para o inverno, verifica-se que ambos os modelos de Hopfield e Saastamoinen não apresentam melhora significativa em planimetria apresentando, respectivamente, discrepâncias da ordem de 0 mm a 2mm. Em altimetria, por sua vez, o modelo de Hopfield

apresentou discrepâncias da ordem de 2 cm a 7 cm, enquanto que o modelo de Saastamoinen apresentou uma degradação da precisão dos dados com discrepâncias que variaram da ordem de 5 cm a 9 cm.

5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES FINAIS

Verifica-se por meio dos resultados obtidos que, de forma geral, o modelo de Hopfield apresentou resultados mais satisfatórios que os valores estimados pelos modelos de Saastamoinen, principalmente no que concerne a altimetria das estações analisadas. Todavia, o período de dados é insuficiente para afirmar qual modelo empírico global é ideal para modelar a Troposfera na região brasileira, assim como constatado na literatura por outros autores.

Por se tratarem de modelos empíricos globais determinados, cujos parâmetros são coletados por meio de radiossondas nos continentes europeu e norte americano, os resultados estimados se tornam muito otimistas e não apresentam as realidades locais e efeitos sazonais de cada região do Brasil. Portanto, para a obtenção de resultados mais consistentes para a identificação do modelo mais adequado para tratar o atraso zenital troposférico dentro do território brasileiro, recomendamos que a metodologia empregada neste trabalho seja associada a períodos de coleta que englobem um período maior de dados, todas as estações do ano e estações localizadas em diversas localidades. Recomendamos também a utilização de funções de mapeamento cujos parâmetros baseiem-se em dados meteorológicos, os quais são aconselhados para análises de redes globais, uma vez que promove uma melhora significativa da repetitividade das coordenadas das estações e, principalmente, por apresentarem uma menor dependência do ângulo de elevação.

REFERÊNCIAS

HOFMANN-WELLENHOF, B; LICHTENEGGER, H; COLLINS, J. *Global Positioning System*. 3. ed. New York: Springer-Verlag, 1994Google Earth. Imagens do Brasil do satélite NOAA. 2013.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, F.; COLINS, J. *GPS: theory and practice*. 5.ed. Wien: Springer, 2001. 382p.

JENSEN, A. B. O.; TSCHERNING, C. C.; MADSEN, F. 2002. *Integrating numerical weather predictions in GPS positioning*. ENC GNSS-2002, Copenhagen, May, 2002.

KLEIJER, F. *Troposphere modeling and filtering from precise GPS leveling*, Publications on Geodesy, no. 56, Netherland Geodetic Commission, Delft, 2004.

KOUBA, J. *Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1)*. Journal of Geodesy, v. 82, p. 193-205, 2007.

MENDES, V. B.; LANGLEY, R. B. 1998. *Tropospheric zenith delay prediction accuracy for airborne GPS high-precision Positioning*. Proceedings of The Institute of Navigation 54th Annual Meeting, Denver, CO, U.S.A., 1-3 June; pp. 337-347.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: UNESP, 2000. 287p.

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

SAPUCCI, LF; 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, 2001, v. 1,p. 47-61.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T. *Variabilidade sazonal do atraso zenital troposférico sobre a América do Sul*. I Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Presidente Prudente. 24-27 de julho de 2007, p. 640-645.

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