



Revista Brasileira de Cartografia (2017), N° 69/2: 303-313
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

INFLUÊNCIA DA ESTIMATIVA DO GRADIENTE HORIZONTAL TROPOSFÉRICO NA QUALIDADE DO POSICIONAMENTO GNSS DE ALTA ACURÁCIA

*Influence of Horizontal Tropospheric Gradient Estimate on the
Quality of High Accuracy GNSS Positioning*

**Paulo Sérgio de Oliveira Jr¹, João Francisco Galera Monico¹
& Luiz Fernando Sapucci²**

**¹Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT**

Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas-PPGCC / Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305. CEP 19060-900. P. Prudente, SP, Brasil
psergio.jr@hotmail.com galera@fct.unesp.br

**²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC**

Rod. Pres. Dutra, s/n - Zona Rural, Cachoeira Paulista - SP, 12630-000, Brasil
luiz.sapucci@cptec.inpe.br

*Recebido em 15 de Outubro, 2016/ Aceito em 17 de Dezembro, 2016
Received on October 15, 2016/ Accepted on December 17, 2016*

RESUMO

Para fins de posicionamento pelo GNSS (Global Navigation Satellite Systems), a atmosfera pode ser dividida em duas camadas principais; a troposfera e a ionosfera. Tais camadas provocam diversos efeitos e interação de formas distintas com os sinais GNSS. A troposfera se estende da superfície terrestre até ~50 km de altitude. Um de seus principais efeitos é o atraso troposférico. No processamento de dados GNSS, estima-se o ZTD (Zenith Tropospheric Delay), o qual é subdividido em duas componentes, hidrostática e úmida. Funções de mapeamento são empregadas para mapear o atraso troposférico da direção satélite-receptor para a zenital. No que concerne à assimetria azimutal existe a possibilidade de estimar os chamados gradientes horizontal troposféricos. Nesse trabalho objetiva-se investigar as vantagens da inserção desse parâmetro no posicionamento GNSS de alta acurácia no modo relativo para linhas de base longa. Considera-se diferentes condições atmosféricas existentes no Brasil em períodos de alta e baixa umidade do ar. Pôde-se constatar que a adoção de gradientes horizontais permite alcançar melhorias de até 3,6 mm na repetibilidade da posição 3D, o que é relevante para aplicações como o monitoramento de deslocamentos de estruturas, onde a acurácia necessária é da ordem de poucos milímetros.

Palavras-chave: Posicionamento GNSS, Alta Acurácia, Gradientes Horizontais Troposféricos, Atraso Zenital Troposférico, Troposfera.

ABSTRACT

In GNSS (Global Navigation Satellite Systems) positioning, the atmosphere can be divided in two main layers, the troposphere and the ionosphere. Such layers cause several effects and interact differently with GNSS signals. The troposphere is the layer extending from Earth's surface up to ~50km. One of its main effects is the tropospheric delay.

In GNSS data processing, the ZTD (Zenith Tropospheric Delay) is estimated, which has two components, hydrostatic and wet. Mapping functions are employed in order to map the tropospheric delay from the satellite-receiver direction to the zenith. Concerning the azimuthal asymmetry there is the possibility of estimating the so called horizontal tropospheric gradients. The aim of this work is to investigate the advantages of the insertion of this parameter in high accuracy GNSS positioning, on relative mode for long baselines. Different atmospheric conditions existing in Brazil are considered, in periods of high and low air humidity. It is verified that the adoption of horizontal gradients allows achieving improvements of up to 3.6 mm in 3D positions repeatability, what is significant for applications like structural monitoring where accuracy of few millimeters is required.

Keywords: GNSS Positioning, High Accuracy, Horizontal Tropospheric Gradients, Zenith Tropospheric Delay, Troposphere.

1. INTRODUÇÃO

O GNSS (Global Navigation Satellite Systems) é composto por diversos sistemas de posicionamento por satélites, quer sejam os existentes (com as suas constelações completas), ou aqueles em desenvolvimento. No primeiro caso, têm-se o GPS (Global Positioning System) e o GLONASS (Global Navigation Satellite System). Em desenvolvimento têm forte destaque o Galileo e o BDS (BeiDou Navigation Satellite System), além de expansões do GNSS como o SBAS (Satellite Based Augmentation System) e o GBAS (Ground Based Augmentation System) (HOFMANN-WELLENHOF, 2008; MONICO, 2008; ALVES *et al.*, 2013).

No intuito de oferecer suporte às diversas aplicações do GNSS, vários métodos têm sido desenvolvidos para explorar a capacidade de tais sistemas em proporcionar informações de posição com alta acurácia (poucos milímetros ou centímetros). Nesse sentido, os efeitos da atmosfera terrestre têm sido um dos grandes desafios para pesquisadores da área, pois consiste em uma das principais fontes de erro envolvidas no posicionamento e navegação com GNSS (GHODDOUSI-FARD, 2009).

Em termos de propagação dos sinais eletromagnéticos, a atmosfera normalmente é dividida em duas camadas: a troposfera e a ionosfera, as quais interagem de diferentes maneiras com os sinais GNSS. Para minimizar os erros provocados por tais interações é necessário aplicar diferentes modelagens para os efeitos de cada camada (SEEBER, 2003).

A ionosfera é um meio ionizado e dispersivo, por outro lado a troposfera é um meio eletricamente neutro e não dispersivo de propagação dos sinais GNSS. Os efeitos provocados pela troposfera são a atenuação

atmosférica, a cintilação troposférica e o atraso troposférico (SPILKER, 1996). Dentre eles o efeito de maior impacto nos sinais GNSS é o atraso troposférico, o qual possui duas componentes principais, hidrostática e úmida (MONICO, 2008).

Com relação à modelagem dos efeitos troposféricos é comum encontrar trabalhos que empregam o modelo modificado de Hopfield (SEEBER, 2003) ou o modelo de Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1972). Mesmo que seja comum estimar uma parte residual, ambos são modelos empíricos desenvolvidos com base em observações meteorológicas realizadas em um período relativamente curto, usando uma base de dados com coleta não homogênea sobre todo o globo, mais adequada no hemisfério norte e sobre regiões continentais. Como são baseados em médias globais, o maior prejuízo gerado pela utilização desses modelos é a perda de sensibilidade das variações diárias e anuais do atraso zenital troposférico (ZTD – Zenith Tropospheric Delay). Uma outra possibilidade amplamente explorada pela comunidade científica trata-se dos modelos de PNT (Previsão Numérica de Tempo), com melhorias recentes os valores de ZTD oriundos de PNT têm sido empregados como alternativa aos modelos empíricos para mitigar os efeitos da troposfera nos sinais GNSS (SAPUCCI *et al.*, 2008; ALVES & MONICO, 2011). Contudo, quando se tem longos períodos de coleta de observações GNSS é possível modelar apenas a componente hidrostática e estimar uma parte residual do ZTD, a componente úmida, com os demais parâmetros no ajustamento de observações GNSS. Assim, por meio dessas estimativas do atraso úmido, para cada receptor, é possível obter o valor do vapor d'água atmosférico (PW - precipitable water), o qual é basicamente a quantidade de

água precipitável em uma coluna atmosférica por unidade de área (SAPUCCI, 2005).

É comum assumir a atmosfera estratificada horizontalmente, ou seja não são consideradas as variações do ZWD (Zenith Wet Delay) com relação ao azimute da direção observada. De acordo com Ghoddousi-Fard (2009) o gradiente horizontal (ou vetor gradiente) é um vetor que indica o sentido e a direção de maior alteração no valor da componente úmida do atraso troposférico por unidade de espaço. Há diversos trabalhos sobre a modelagem do ZTD, bem como sobre as funções de mapeamento do mesmo (NIELL, 1996; SAPUCCI, 2005; FUND, 2009; BOEHM, *et al.*, 2006), porém não existe uma quantidade expressiva de estudos sobre os efeitos dos gradientes horizontais troposféricos em estimativas de ZWD e coordenadas à partir de observações GNSS (GHODDOUSI-FARD, 2009; MOREL *et al.*, 2014). Embora, para a maioria das aplicações, seja suficiente assumir que a atmosfera é subdividida horizontalmente em camadas e que a simetria azimutal é apropriada, a mesma pode introduzir erros significativos (3 à 7 mm) em medidas geodésicas com condições atmosféricas assimétricas (EMARDSON, 1998). Tal aspecto deve ser considerado nas aplicações em que alta acurácia é requerida. No contexto desse estudo, entende-se por alta acurácia, erros de ordem milimétrica ou de poucos centímetros na estimativa de coordenadas por GNSS.

De modo geral, o presente trabalho visa investigar se a inserção dos gradientes horizontais pode ser relevante para o posicionamento GNSS no modo relativo com linhas de base longas e, em caso afirmativo, em quais casos os mesmos devem ser considerados. Para tanto, evidenciase a influência dos gradientes troposféricos no posicionamento GNSS, sob diversas condições da atmosfera e situações geográficas existentes no Brasil.

O trabalho é organizado de forma que na seção 2 apresenta-se um breve detalhamento da importância dos gradientes horizontais no processamento de dados GNSS, bem como sua inserção como parâmetro no modelo matemático. Na seção 3, são descritos os materiais e métodos empregados para obtenção das análises e resultados discutidos na seção 4. Finalmente, a seção 5 traz as considerações finais, bem como as perspectivas para trabalhos futuros.

2. NÃO SIMETRIA AZIMUTAL E GRADIENTE HORIZONTAL TROPOSFÉRICO

Nas seções seguintes é discutida a importância dos gradientes horizontais troposféricos, bem como sua incorporação ao modelo funcional.

2.1 Relevância dos gradientes horizontais

Como dito anteriormente, nem sempre é suficiente assumir que a atmosfera é subdividida horizontalmente em camadas de intensidade uniforme, ou seja que não é relevante considerar as variações azimutais. Sabe-se portanto que ao mapear o atraso troposférico estimado na direção zenital para uma determinada direção inclinada, o valor mapeado não pode ser considerado igual para todas as direções. Sobretudo, no que concerne à componente úmida do ZTD, haja vista a grande variabilidade desta componente. Isso se deve aos deslocamentos rápidos de massa de ar úmido, além de outros fatores frequentemente citados na literatura, como alterações de temperatura e pressão parcial do vapor d'água atmosférico (SPILKER, 1996; SAPUCCI, 2001; MONICO, 2008).

O atraso troposférico estimado em uma determinada época pode ter um valor diferente para direções distintas ao ser projetado em uma direção inclinada, ainda que essas direções possuam o mesmo ângulo de elevação, devido à heterogeneidade das condições meteorológicas nos trajetos percorridos pelos sinais de diferentes satélites. A Figura 1 visa ilustrar tal situação, onde embora os atrasos troposféricos para componente úmida na direção inclinada (SWD – Slant Wet Delay) para os satélites 1 e 2 tenham o mesmo ângulo de elevação, quando mapeados para a direção zenital serão representados por um único valor de ZWD. Dessa forma, a estimativa de gradientes horizontais pode melhorar a modelagem dos efeitos troposféricos no processamento de dados GNSS.

Segundo Meindl *et al.* (2004), as observações com ângulos de elevação inferiores à 15° são essenciais para melhorar a acurácia das soluções GNSS de modo geral, em particular para decorrelacionar as alturas estimadas para estações e correções ao atraso zenital troposférico. Sabendo-se que a ordem de grandeza dos gradientes horizontais é maior para baixos ângulos de elevação, nesses casos haverá maior probabilidade de melhorias no posicionamento GNSS.

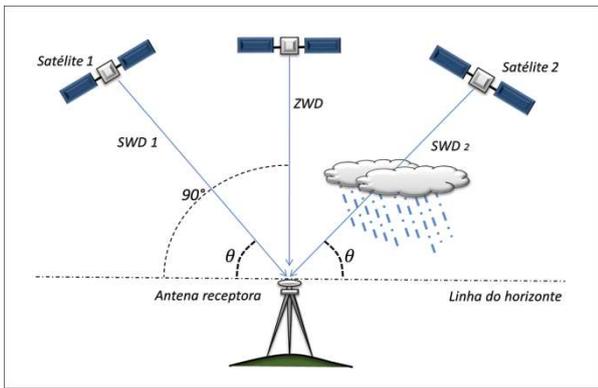


Fig. 1 – Receptor GNSS em presença de condições atmosféricas com deslocamento de massa de ar úmido.

Dentre os trabalhos envolvendo a estimativa de gradientes horizontais destacam-se Sguerso *et al.* (2015) que conduziu estudos de 14 anos de estimativa dos gradientes troposféricos utilizando 181 estações GNSS localizadas entre a Itália e a França, na região dos Alpes. Os resultados detectaram que alterações de hardware e software geram relativa influência nas estimativas dos parâmetros relacionados à troposfera, além disso o estudo enfatiza a contribuição desses parâmetros para o estudo do clima. Benefícios para o posicionamento GNSS (BAR-SEVER *et al.*, 1998) ou VLBI (CHEN & HERRING, 1997) com introdução de gradientes horizontais foram evidenciados na literatura. Morel *et al.* (2014) discute o significado físico de gradientes horizontais estimados durante todo o ano de 2011 em estações GNSS pertencentes ao IGN (Institut Géographique National) na ilha da Córsega localizada no Mar Mediterrâneo. Nesse estudo foi observada concordância entre gradientes horizontais obtidos através de diferentes softwares e em diferentes métodos de posicionamento (relativo e PPP). No que se refere ao emprego dos gradientes horizontais

para aplicações meteorológicas, Li *et al.* (2015) evidenciou o potencial dos gradientes horizontais troposféricos obtidos com alta resolução para melhorias nos modelos de previsão numérica de tempo.

2.2 Modelo funcional e processo estimatório

Quando se leva em consideração a não simetria azimutal, a representação do ZTD com os parâmetros dos gradientes troposféricos, nas direções norte (GN- Gradient North) e leste (GE – Gradient East), é dada pela expressão (1) (GHODDOUSI-FARD, 2009; HERRING *et al.*, 2010):

$$ZTD_{(E,Az)} = ZHDmf_h(E) + ZWDmf_w(E) + mf_g(E)(GN \cos(Az) + GE \sin(Az)) \quad (1)$$

sendo que o termo E representa o ângulo de elevação do satélite, A_z denota o azimute do satélite, e mf_g a função de mapeamento para os gradientes troposféricos, dada pela equação (2) (CHEN & HERRING, 1997):

$$mf_g = \frac{1}{(\sin(E) \tan(E) + C)} \quad (2)$$

onde, de acordo com Chen e Herring (1997), C pode ser considerado constante e equivalente a 0,0032. Seu valor afeta a função de mapeamento apenas para ângulos de elevação muito baixos, onde $\cos(E)$, é aproximadamente 1. Porém, o autor evidencia que valores diferentes para podem ser determinados de acordo com o valor da refratividade atmosférica e da altura da estação.

Considerando-se as equações de pseudodistância e de fase da onda portadora pode-se exemplificar a matriz design e o

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \Delta PD_{rL_i}^{S_j} \\ \lambda_{L_i} \phi_{L_i}^{S_j} \end{bmatrix} \right\} = AX$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{(X^{S_j} - X_r^0)}{(\rho_r^{S_j})^0} & -\frac{(Y^{S_j} - Y_r^0)}{(\rho_r^{S_j})^0} & -\frac{(Z^{S_j} - Z_r^0)}{(\rho_r^{S_j})^0} & 1 & mf_w(E) & mf_g \sin(Az) & mf_g \sin(Az) & 0 \\ -\frac{(X^{S_j} - X_r^0)}{(\rho_r^{S_j})^0} & -\frac{(X^{S_j} - X_r^0)}{(\rho_r^{S_j})^0} & -\frac{(X^{S_j} - X_r^0)}{(\rho_r^{S_j})^0} & 1 & mf_w(E) & mf_g \cos(Az) & mf_g \sin(Az) & \lambda_{L_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ cdt_r \\ ZWD \\ GE \\ GN \\ N_{L_i}^{S_j} \end{bmatrix} \quad (3)$$

vetor dos parâmetros à serem estimados no posicionamento GNSS com um receptor isolado (caso posicionamento absoluto) com a seguinte configuração (3):

onde:

$E\{\cdot\}$ – caracteriza o operador de esperança matemática;

$\lambda_{Li}\phi_{Li}^{Sj}$ – diferença entre a fase observada e a calculada (vetor L para fase), em metros;

ΔPD_{rLi}^{Sj} – diferença entre a pseudodistância observada e a calculada (vetor L para a pseudodistância), em metros;

$(\rho_r^{Sj})^0$ – distância geométrica (entre as antenas do satélite e do receptor) calculada em função dos parâmetros aproximados, em metros;

X^{Sj}, Y^{Sj}, Z^{Sj} – representam as coordenadas, em metros, do satélite GNSS j;

X_r^0, Y_r^0 e Z_r^0 – representam as coordenadas aproximadas da antena do receptor GNSS r.

Considerando-se que as três primeiras colunas da matriz possuem os cossenos diretores para o vetor entre as antenas do satélite e do receptor, pode-se inferir que todos os coeficientes da matriz A devem ter valores iguais ou inferiores a 1.

O sistema de equações apresentados em (3) que corresponde ao posicionamento da antena de um receptor isolado, pode ser propagado para o método relativo desenvolvendo-se as simples e duplas diferenças das equações de observação. Porém, em ambos os casos a inserção dos gradientes horizontais adiciona dois parâmetros à serem estimados no ajustamento, o que reduz os graus de liberdade. Tanto para o atraso troposférico correspondente à componente úmida quanto para

os gradientes horizontais troposféricos, o processo mais indicado para modelagem é o chamado random walk (BLEWITT, 1998; SAPUCCI, 2001). Essa modelagem é caracterizada principalmente pelo aumento da incerteza dos parâmetros ser proporcional à raiz quadrada do intervalo de tempo entre as épocas de processamento. Deve-se adotar um intervalo de tempo apropriado para decorrelacionar as observações entre as épocas. O que pode variar de acordo com o período total de coleta, modo de posicionamento (estático ou cinemático), dentre outros aspectos. Normalmente, emprega-se intervalos variando de 1 à 30 segundos. Quanto maior o intervalo, mais decorrelacionadas estarão as observações (KOUBA, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Procurou-se realizar experimentos que abrangessem o comportamento do gradiente horizontal no território nacional explorando-se as diferentes características regionais do Brasil. Para tanto, foram criadas cinco campanhas de processamento de dados GNSS no software Bernese 5.2 (DACH *et al.*, 2015) de modo que se considerou redes locais de processamento compostas por estações da RBMC em cada uma das regiões geográficas brasileiras: Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul. A Figura 2 apresenta a localização aproximada de cada uma dessas redes locais. Foram selecionadas cinco estações por região, e as estratégias de processamento são apresentadas na Tabela 1. Como os gradientes horizontais estão mais associados à umidade, procurou-se avaliar dois períodos por região: seco e úmido.

Tabela 1: Estratégia de processamento no software Bernese 5.2

Parâmetro	Descrição
Intervalo das observações	15 segundos
Produtos orbitais	IGS finais / precisos
Modelo de cargas oceânicas	FES 2004 (Finite Element Solution – 2004)
Reference frame	ITRF2008
Máscara de elevação	5 graus
Ionosfera	Quasi-ionospheric free (L3) - solução das ambiguidades
Função de mapeamento	GMF
Desvio padrão aplicado às coordenadas das estações injuncionadas	Variando de 1 à 2 cm, de acordo com a precisão divulgada para as coordenadas SIRGAS-CON
Modo de processamento	Relativo

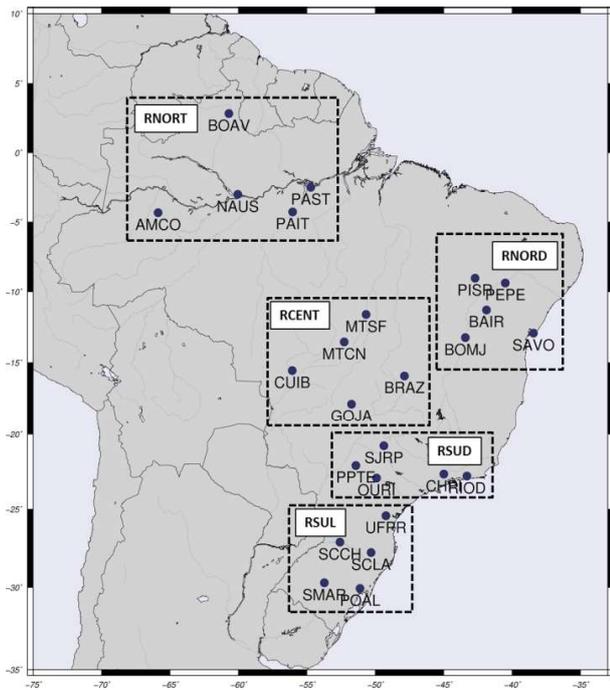


Fig. 2 – Localização das redes experimentais de processamento

As nomenclaturas das campanhas para cada uma das regiões, bem como as estações envolvidas no processamento são apresentadas na Tabela 2. Para cada rede, optou-se por injuncionar as coordenadas de duas estações, que consequentemente provém o datum para a solução final e não tem influencia as análises em questão. As estações injuncionadas foram escolhidas de forma que houvesse boa geometria das linhas de base. Isto significa que cada estação cujas coordenadas deverão ser estimadas, é conectada a pelo uma das duas estações à serem injuncionadas. Evidentemente,

foram selecionadas apenas linhas de base que caracterizam vetores independentes.

É importante frisar que as injunções são aplicadas apenas à solução final no módulo chamado ADDNEQ do Bernese 5.2. Para o peso da injunção considerou-se as informações de precisão das coordenadas provenientes da solução multianual do processamento da rede SIRGAS-CON, ITRF2008 (International Terrestrial Reference Frame – 2008), na época da campanha.

Ao todo foram processadas quatro semanas de observações para cada região, sendo duas semanas contínuas durante o período seco e duas no período úmido. A Tabela 3 apresenta tais períodos (dias do ano) selecionados para avaliação do impacto do gradiente horizontal no posicionamento GNSS. Com exceção da estação PAIT cujos dados não estavam disponíveis para o período seco, os dados de todas as estações estiveram disponíveis durante os dias dos experimentos. Considerou-se os mesmos períodos para todas as regiões para que fosse possível realizar comparação dos resultados obtidos entre as regiões. De modo à evidenciar as diferenças regionais para uma mesma época do ano.

Com exceção das estações PAIT e PAST, todas as estações envolvidas no processamentos possuem observações GPS e GLONASS.

Como dados de entrada para o processamento é importante lembrar que além das observações contidas nos arquivos RINEX, e das orbitas precisas IGS, também foram empregados os arquivos de DCBs do CODE, os arquivos de cargas atmosféricas e os parâmetros do modelo de cargas oceânicas.

Tabela 2: Estações utilizadas nos processamentos no Bernese 5.2

Região	Nomenclatura da campanha	Estações envolvidas no processamento	Estações injuncionadas
Sul	RSUL	POAL, SMAR, UFPR SCCH, SCLA	UFPR, POAL
Sudeste	RSUD	PPTE, SJRP, OURI, CHPI, RIOD	PPTE, CHPI
Centro-oeste	RCENT	BRAZ, GOJA, MTSF CUIB, MTCN	BRAZ, CUIB
Nordeste	RNORD	PEPE, PISR, BAIR, BOMJ, SAVO	PISR, SAVO
Norte	RNORT	AMCO, BOAV, NAUS, PAIT, PAST	BOAV, NAUS

Tabela 3: Períodos selecionados para avaliação do impacto do gradiente horizontal no posicionamento.

	Período úmido	Período Seco
Semana 1	001/2014 – 007/2014	183/2014 – 190/2014
Semana 2	008/2014 – 014/2014	191/2014 – 197/2014

4. RESULTADOS E ANÁLISES

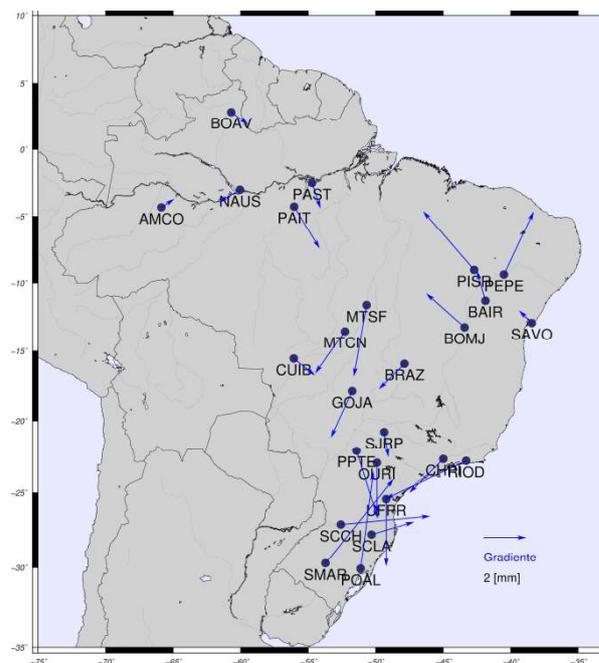
Nessa seção são discutidos os resultados e análises obtidos com o emprego da metodologia descrita anteriormente.

4.1 Representação do vetor gradiente no Brasil

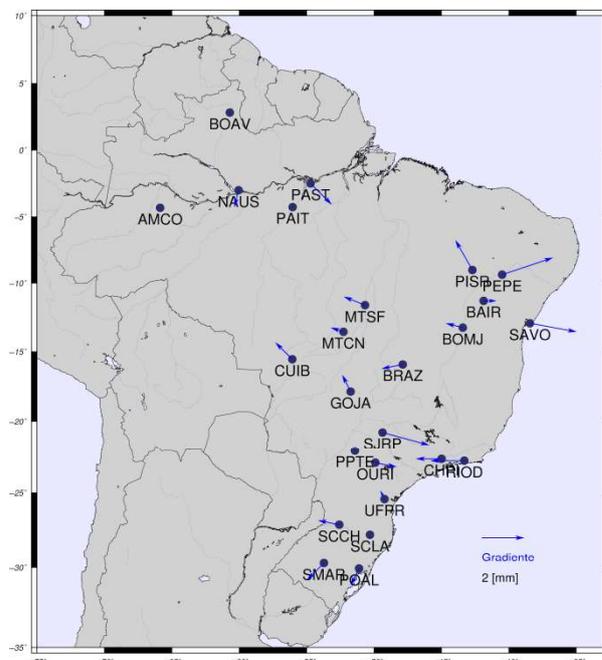
No intuito de verificar o comportamento e a ordem de grandeza do parâmetro estimado como gradiente horizontal foram consideradas suas componentes GE e GN para os dois períodos, seco e úmido. A partir das quantidades médias para as componentes E e N foi determinado o vetor resultante do gradiente horizontal. A Figura 3 mostra exemplos para a representação dos valores resultantes para todas as estações das redes nos processamentos realizados.

Pode-se verificar que no período úmido os valores dos gradientes horizontais possuem valores maiores que no período seco. Além disso, os gradientes estimados nas estações ao sul do Brasil foram relativamente maiores. Isso poderia ser explicado pelo fato de o gradiente horizontal também estar associado às variações de relevo nas proximidades das estações GNSS, conforme verificado por Morel *et al.* (2014). Isso ocorre, possivelmente, devido ao suave aumento na concentração da pressão parcial de vapor d’água próximo aos paredões montanhosos quando se chocam com massas de ar úmido.

No caso do Brasil essas variações de relevo são mais presentes nas regiões sul e sudeste, e também próximo ao litoral. Por outro lado, na região amazônica, onde concentram-se altos índices de umidade do ar, os gradientes não apresentaram valores significativos, sugerindo a existência de simetria azimutal no que concerne as variações do atraso úmido na região. No entanto, para obter resultados conclusivos estudos plurianuais se fazem necessários.



(a) Período úmido (dia 04/2014)



(b) Período seco (dia 184/2014)

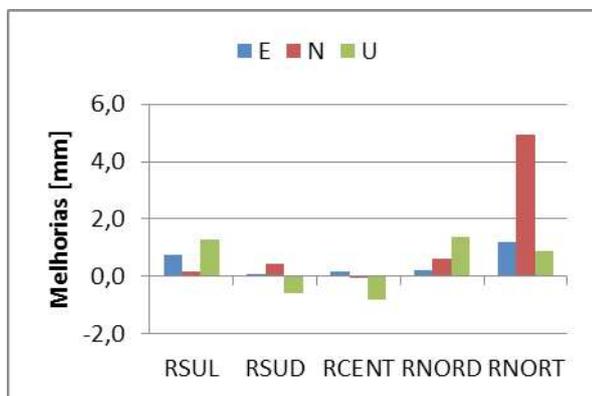
Fig. 3 – Representação do vetor resultante das componentes GE e GN do gradiente horizontal troposférico.

4.2 Análise do impacto provocado pelos gradientes horizontais na repetibilidade das coordenadas

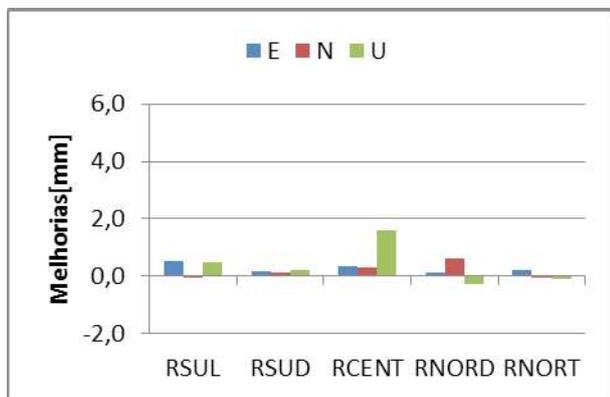
Para avaliar o impacto dos gradientes na região brasileira de modo geral, foram determinadas as melhorias ou perdas obtidas na repetibilidade das

coordenadas das estações em cada uma das sub-redes. Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os ganhos em termos de RMS (Root Mean Square) absoluto (mm) e relativo (%), respectivamente.

Os valores médios para as melhorias alcançadas nas coordenadas de estações de cada uma das cinco campanhas podem ser verificados na Tabela 4. Em média o RMS para a repetibilidade das coordenadas no período úmido diminuiu 0,48mm, 1,22mm e 0,41mm (Tabela 4), o que representa melhorias de 17,98%, 16,48% e 5,68% (Tabela 5) para as componentes E, N e U, nessa ordem. No período seco, tais valores correspondem à 0,27mm, 0,19mm e 0,38mm, caracterizando melhorias de 22,94%, 17,38% e 11,98%.



(a) Período seco



(b) Período úmido

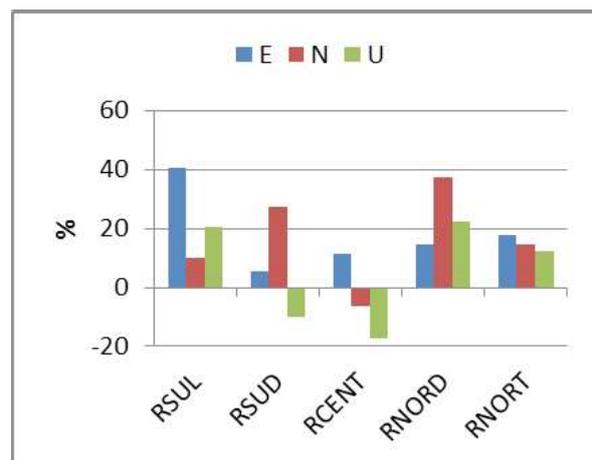
Fig. 4 – Melhorias em “mm” no RMS das coordenadas obtidas com adoção dos gradientes horizontais em cada região de estudo.

Algo que se destaca na Figura 4 é que no período considerado seco (com baixa precipitação) houve melhorias mais expressivas na região norte com o uso dos gradientes. Acredita-se que isso se deva ao fato de que embora não haja precipitação o vapor d’água nessa região é sempre elevado dada as altas temperaturas e as grandes fontes de

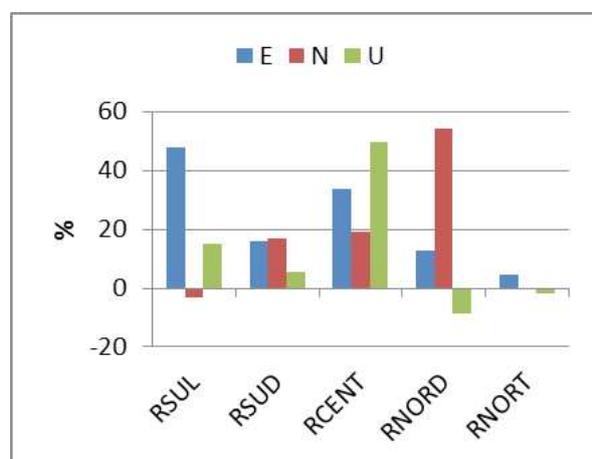
umidade como a transpiração da floresta e o fluxo de umidade do oceano. Os resultados indicam que o uso do gradiente permite minimizar os efeitos desse de vapor mesmo no período sem precipitação. No período úmido com a maior homogeneidade da distribuição espacial do vapor d’água a eficiência em considerar o gradiente mostrou-se menos relevante.

Tabela 4: Comparativo entre os resultados de todas as regiões para os ganhos em milímetros nas melhorias alcançadas com e sem a adoção dos gradientes horizontais

	Período Úmido			Período Seco		
	E(mm)	N(mm)	U(mm)	E(mm)	N(mm)	U(mm)
RSUL	0,76	0,18	1,27	0,51	-0,03	0,47
RSUD	0,08	0,43	0,60	0,14	0,14	0,20
RCENT	0,18	0,07	0,83	0,34	0,28	1,61
RNORD	0,19	0,62	1,35	0,13	0,60	-0,29
RNORT	1,19	4,95	0,87	0,23	-0,04	-0,10
Média	0,48	1,22	0,41	0,27	0,19	0,38



(a) Período seco



(b) Período úmido

Fig. 5 – Melhorias em “%” no RMS das coordenadas obtidas com adoção dos gradientes horizontais em cada região de estudo.

Tabela 5: Percentual do erro total reduzido devido à adoção de gradientes horizontais troposféricos.

	Período Úmido			Período Seco		
	E(%)	N(%)	U(%)	E(%)	N(%)	U(%)
RSUL	40,59	10,09	20,42	47,89	-3,16	15,27
RSUD	5,57	27,16	-9,92	15,82	16,88	5,45
RCENT	1,46	-6,51	-17,10	33,83	19,37	49,77
RNORD	14,68	37,27	22,52	12,75	54,05	-8,82
RNORT	17,61	14,40	12,49	4,43	-0,22	-1,75
Média	17,98	16,48	5,68	22,94	17,38	11,98

Também verificou-se reduções nos valores do fator de variância a posteriori, tornando o mesmo mais próximo do valor ideal que seria 1 (razão com respeito ao fator de variância à priori), quando o gradiente horizontal foi estimado (Tabela 6), o que indica que os erros sistemáticos foram modelados de melhor maneira quando esse parâmetro foi considerado. Porém, é importante frisar que os valores encontrados ainda encontram-se distantes do ideal especialmente na região norte. Isso indica a presença de deficiências no modelo.

Tabela 6: Média dos valores do fator de variância à posteriori com e sem a estimativa dos gradientes horizontais, considerando-se todos os dias do experimento

	Estimativa do gradiente horizontal troposférico	
	Não	Sim
RSUL	2,40	2,30
RSUD	2,92	2,85
RCENT	2,52	2,47
RNORD	3,00	2,93
RNORT	3,01	2,96

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

Foram conduzidos experimentos nas regiões norte, sul, sudeste, centro-oeste e nordeste, as quais possuem características topográficas e climáticas relativamente diferentes. Selecionou-se cinco estações por região, e as estratégias de processamento testadas para cada uma das redes foi exatamente à mesma, de modo que as comparações possam ser válidas.

Como os gradientes horizontais estão mais associados à umidade, procurou-se avaliar dois períodos por região: seco e úmido. Tais testes

apresentaram valores médios para as melhorias em praticamente todas as estações GNSS nas regiões dos experimentos. De modo que, em média, o RMS para a repetibilidade das coordenadas no período úmido apresentou redução de 0,48mm, 1,22mm e 0,41mm, o que representa melhorias de 17,98%, 16,48% e 5,68%, nesse período para as componentes E, N e U, respectivamente. No período seco, tais valores correspondem 0,27mm, 0,19mm e 0,38mm, caracterizando melhorias de 22,94%, 17,38% e 11,98%.

Adicionalmente, foram avaliados os valores do fator de variância à posteriori para cada uma das redes de ajustamento. Quando esse valor se aproxima de 1, tem-se indícios de que os erros (sistemáticos e grosseiros) estão praticamente descartados. Em todos os casos verificou-se pequenas melhorias nesse fator de referência, o qual ficou mais próximo de 1, quando o gradiente horizontal troposférico foi estimado na solução do ajustamento de observações GNSS.

Os resultados desse estudo indicam que a adoção ou não dos gradientes horizontais deve ser considerada com certo cuidado para projetos de engenharia em que se realiza posicionamento pelo GNSS no intuito de determinar coordenadas com repetibilidade milimétrica ou mesmo centimétrica, como por exemplo monitoramento de estruturas como barragens ou pontes.

Em trabalhos futuros, as melhorias no teste qui-quadrado deverão ser estudadas com maior cuidado, pois embora os resultados do processamento com os gradientes tenham sido melhores, ainda assim podem ser considerados elevados. Além disso, pode-se investigar a influência de outros parâmetros do processamento como, por exemplo, diferentes intervalos de coleta.

A qualidade do ajustamento melhorou ao se utilizar as estimativas dos gradientes, ainda que de forma reduzida. Assim, a aplicação de um teste de variâncias entre os resultados com e sem estimativa do gradiente horizontal é recomendável para maior rigor dos resultados indicados pelo presente estudo.

Embora os testes realizados tenham sido bastante reduzidos, há uma indicação que o método deve ser aplicado em posicionamento de alta acurácia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro a este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. GPS/VRS positioning using atmospheric modeling. **GPS Solutions**, Heidelberg, v. 15, p. 253-261, 2011.

BAR-SEVER, Y. E.; KROGER, P. M.; BORJESSON, J. A. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. **Journal of Geophysical Research**, 103 (B3), p. 5019-5035, 1998.

BLEWITT, G. GPS data processing methodology. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 231-270, 1998

BOEHM, J.; NIELL A. E.; SCHUH, H.; TESMER, V.; TREGONING, P. Mapping functions for atmospheric delay modelling in GNSS analysis. **Journal of Geophysical Research**, p 1-4, 2006.

CHEN, G., and T.A. HERRING, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. **Journal of Geophysical Research** Vol. 102, No. B9, p. 20489-20502, 1997.

DACH, R. LUTZ, S. WALSER, P. FRIDEZ, P. **Bernese GNSS Software Version 5.2**. Astronomical Institute, University of Bern. 884 p., Novembro 2015.

EMARDSON, T. R. **Studies of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System**. School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. Technical Report No. 339, 220 p., 1998.

FUND, F., **Observations GPS et retards troposphériques : modélisations et application aux effets de surcharge océanique dans l'Ouest de la France**. 2009. 292 p. Tese (Doutorado),

Université de Nantes, Nantes, France, 2009.

GHODDOUSI-FARD, R. **Modelling Tropospheric Gradients and Parameters from NWP Models: Effects on GPS Estimates**. 2009. 216 p. Tese (Doutorado) Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 264, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada. 2009.

HERRING, T. A.; KING, R. W.; MCCLUSKY, S. C.; **GAMIT Reference Manual - GPS Analysis at MIT**. Release 10.4. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 171 p., 2010.

HOFMANN - WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GNSS - GPS: Theory and Practice**. 3.ed. New York: Springer-Verlag, 400 p., 1994.

KOUBA, J. **A guide to using International GNSS Service (IGS) products**. Natural Resources Canada - Geodetic Survey Division. 34 p., 2009.

LI, X.; ZUS, F.; LU, C.; NING, T.; DICK, G.; GE, M.; WICKERT, J.; SCHUH, H. Retrieving high-resolution tropospheric gradients from multiconstellation GNSS observations, **Geophysical Research Letters**, n 42, 4173–4181, 2015

NIELL, A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at ratio wavelengths. **Journal of Geophysical Research** v.101, n. B2, p.3227-3246, 1996.

MEINDL, M., SCHAER, S., HUGENTOBLE, U., e BEUTLER, G. Tropospheric Gradient Estimation at CODE: Results from Global Solutions, in Applications of GPS Remote Sensing to Meteorology and Related Fields. In **Journal of the Meteorological Society of Japan**, 82(1B):331 – 338, 2004.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora Unesp, 476 p., 2008.

MOREL, L.; POTTIAUX, E.; DURAND, F.; FUND, F.; BONIFACE, K.; OLIVEIRA JUNIOR, P. S.; BAELEN, J. V. Validity and Behaviour of Tropospheric Gradients Estimated by GPS in Corsica. **Advances in Space**

Research, 55, 135-149, 2014.

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

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. 167 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia**. 2005. 200 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista Presidente Prudente, 2005.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.;

MONICO, J. F. G. Aplicações dos valores do IWV provenientes das redes de receptores GPS para suporte à previsão numérica de tempo no Brasil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 49-55, 2008.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. 2ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 612 p. 2003.

SQUERSO, D., LABBOUZ, L. & WALPERSDORF, A. 14 years of GPS tropospheric delays in the French–Italian border region: comparisons and first application in a case study. **Applied Geomatics**, 8: p 13-25, 2015.

SPIPKER, J. J. Tropospheric Effects on GPS. 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.