

RESULTADOS OBTIDOS APLICANDO MAPAS DE IONOSFERA PARA POSICIONAMENTO ABSOLUTO E RELATIVO NA AMÉRICA DO SUL

Sonia Maria Alves Costa

Alberto Luis da Silva

Newton José de Moura Júnior

Mário Alexandre de Abreu

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE

Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia

Av. Brasil 15671, CEP: 21241-051, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

e-mail: {sonia.alves, alberto.luis, newton.junior, mario.abreu}@ibge.gov.br

Mauricio Alfredo Gende

Claudio Antonio Brunini

Universidad Nacional de La Plata

Faculdade de Ciências Astronômicas e Geofísicas

Paseo Del Bosque S/N 1900, La Plata, Argentina.

e-mail: {mgende, cbrunini}@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMO

Este trabalho apresenta duas estratégias com o objetivo de melhorar as coordenadas obtidas através do processamento de dados GPS utilizando mapas de ionosfera na América do Sul, região a qual possui uma forte atividade ionosférica.

Desde 2005, o Centro de Processamento de La Plata (CPLAT) utiliza o Modelo Ionosférico de La Plata (LPIM) aplicado a 50 estações GPS na América do Sul para gerar diariamente mapas que representam o número vertical total de elétrons – $vTEC$ em um sistema de referência solar-geomagnético usando harmônicos esféricos. Para converter o TEC oblíquo ($sTEC$) em $vTEC$, se usa uma função de mapeamento que supõe a ionosfera como uma camada infinitesimal.

Desde 2003, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE colabora na manutenção da Rede de Referência na América do Sul, processando semanalmente os dados GPS das mesmas estações utilizadas pelo CPLAT para calcular os mapas da ionosfera. Esse processamento é realizado no modo diferencial utilizando aproximadamente 59 estações localizadas na América do Sul e Antártica, formando linhas de base que podem chegar a distâncias superiores a 2000 km, sendo recomendado, portanto, a utilização de modelos de ionosfera na determinação das ambigüidades, e consequentemente na obtenção de coordenadas.

Este trabalho avalia dois possíveis benefícios dos mapas $vTEC$ nos resultados de processamento GPS: a resolução das ambigüidades em uma solução diferencial e a redução do erro ionosférico em uma solução absoluta. Os mapas de ionosfera são aplicados no processamento diferencial na etapa de resolução de ambigüidades, usando o software Bernese, desenvolvido pelo Instituto Astronômico da Universidade de Berna. No processamento realizado no modo absoluto os mapas de ionosfera são usados para reduzir o erro ionosférico usando o software PPP, desenvolvido pelo Geodetic Survey Division – GSD, Natural Resources Canada (NRCan). Os dados GPS são processados no modo diferencial e absoluto em quatro diferentes períodos de 2006, cujas estações encontram-se próximas à zona de anomalia ionosférica.

PALAVRAS CHAVES: PPP, mapas de ionosfera, GPS, posicionamento relativo.

ABSTRACT

This paper presents two strategies for improving GPS coordinate solutions using regional ionosphere maps in South America, a region that presents a strong ionospheric activity.

Since 2005, La Plata Ionosphere Model (LPIM) is used to generate daily Vertical Total Electron Content (VTEC) maps by CPLAT (La Plata Processing Center) using about 50 GPS stations in South America. The vertical total electron content (VTEC) is modeled in a solar-geomagnetic reference frame using a spherical harmonic expansion. To convert slant TEC (STEC) into VTEC, a single-layer model mapping function is adopted.

Since 2003, the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) collaborates to maintain the SIRGAS Reference Frame in South America, delivering weekly coordinate solutions using the same set of permanent stations that the CPLAT uses for computing ionosphere maps. This processing is carried out in a differential way utilizing approximately 59 stations located in South America and the Antarctic. Since baselines reach lengths of over 2000 km, it is recommended to use ionosphere models to resolve ambiguities and consequently in obtaining coordinates.

This work examines two possible benefits of VTEC maps in GPS processing namely, to solve ambiguities in differential solution and to mitigate ionosphere bias in single frequency undifferenced solution. For differential processing, ionosphere maps are applied in the ambiguity resolution step when using Bernese GPS software. For undifferential processing, ionosphere maps are used to mitigate ionospheric errors when using GPS Precise Point Positioning (PPP) software, developed by the Geodetic Survey Division (GSD), Natural Resources Canada (NRCAN). In order to validate our proposal a network of GPS stations near the South Atlantic ionosphere anomaly region in four different periods of 2006 was processed with and without VTEC regional ionosphere maps.

KEYWORDS: PPP, ionosphere maps, GPS, differential solution

1 INTRODUÇÃO

Há mais de uma década, o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), vêm trabalhando com o propósito de materializar a melhor rede de referência geodésica usando observações por satélite.

Atualmente, mais de 70% dos países sul-americanos adotaram o SIRGAS como sistema de referência e estão estabelecendo estações GPS permanentes nos seus territórios. No último encontro do Grupo de Trabalho I – GT I, responsável pela Rede de Referência, foram estabelecidos cinco centros de processamento, sendo eles: Instituto Nacional de Estatística Geografia e Informática - INEGI, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, Universidad Nacional de La Plata – UNPL e o Instituto Geográfico Militar de Argentina – IGMA (SIRGAS, 2007). Na mesma ocasião o GT I promoveu um convite para a um experimento piloto dedicado ao estabelecimento de um serviço regular para calcular e disponibilizar mapas regionais de ionosfera para a América do Sul (MRIs-AS) do vTEC (vertical *Total Electron Content*), baseado em dados GPS da rede sul-americana. Este convite é uma motivação com o objetivo de melhorar a qualidade dos modelos vTEC (baseados em observações GPS) na América do Sul, aonde a presença das anomalias equatorial e do Atlântico Sul conduzem a uma distribuição complexa modelagem do vTEC (Brunini et al, 2007).

Outra iniciativa do GT I fornecer serviços *on-line* para processamento de dados GPS usando o *software* CSRS-PPP (Tétraud et al, 2005) (GSD, 2004). Este software foi desenvolvido pela Divisão de Geodésia (GSD) do *Natural Resources Canada*

(NRCAN) e fornecido ao IBGE no escopo do PIGN (PIGN, 2007). Em um primeiro passo, deverão ser realizados estudos relacionados com a melhoria das soluções empregando mapas regionais da ionosfera e a inclusão de parâmetros de transformação entre os sistemas ITRF e SIRGAS2000. Neste trabalho será explorada somente a aplicação dos MRIs-AS em comparação com o GIM (Global Ionosphere Maps).

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 contém uma breve introdução sobre os mapas globais da ionosfera calculados pelo IGS (International GNSS Service); a seção 3 informa sobre os dados usados no cálculo MRIs-AS; seção 4 apresenta uma breve descrição do LPIM; a seção 5 descreve os experimentos realizados com os mapas global e regional; as seções 6 e 7 apresentam os resultados dos testes realizados no processamento GPS com zero e simples diferença de fase, bem como usando código (na fase L1) e dupla frequência (L1 e L2), trabalhando com os *softwares* CSRS-PPP e Bernese.

2 MAPAS GLOBAIS DA IONOSFERA – GIMs

Desde a criação do Grupo de Trabalho da Ionosfera no IGS, é fornecido para comunidade a combinação dos resultados de cinco centros de processamento, os quais disponibilizam um *grid* bi-dimensional diário do vTEC em nível global (Feltens e Schaer, 1998). O GIM do IGS é gerado através da média ponderada do GIM fornecido por cada centro de análises. As principais características do GIM são:

- Uso da latitude geomagnética no processo de interpolação,
- A distribuição do vTEC em uma superfície de altitude de aproximadamente 450 km é representada por uma expansão de harmônicos esféricos até o grau e ordem 15,

- O arquivo diário é dividido em 12 períodos de 2 horas e um conjunto completo de coeficientes é calculado para cada período.
- O GIM IGS usa dados de cerca de 300 estações distribuídas homogeneamente no mundo todo.

3 DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Os cinco centros dedicados ao processamento da rede de referência SIRGAS, têm a tarefa de fornecer soluções semanais desde a semana GPS 1400. Semanalmente os resultados de cada centro são comparados e combinados. Após este período experimental, pretende-se colaborar com o IGS RNAAC SIR a fim de gerar soluções combinadas para a Rede GPS permanente nas Américas do Sul e Central.

Os dados usados nos experimentos propostos pertencem à rede GPS permanente na América do Sul. As soluções diárias e semanais dessa rede são calculadas pela Universidade de La Plata, na Argentina e pelo IBGE no Brasil. Os dados GPS de quatro dias (dias: 9, 120, 177 e 258) de 2006 foram selecionados para gerar os MRI – AS. Os dados de 50 estações na América do Sul (Figura 1) foram utilizados para produzir os MRI – AS, enquanto para os GIMs são usados 13 estações na mesma região. Para a análise dos resultados utilizando estes dois mapas (MRI-AS e GIMs), foram usadas 9 estações (Tabela 1) com uma boa distribuição geográfica na América do Sul e com diferentes modelos de receptor e antena.

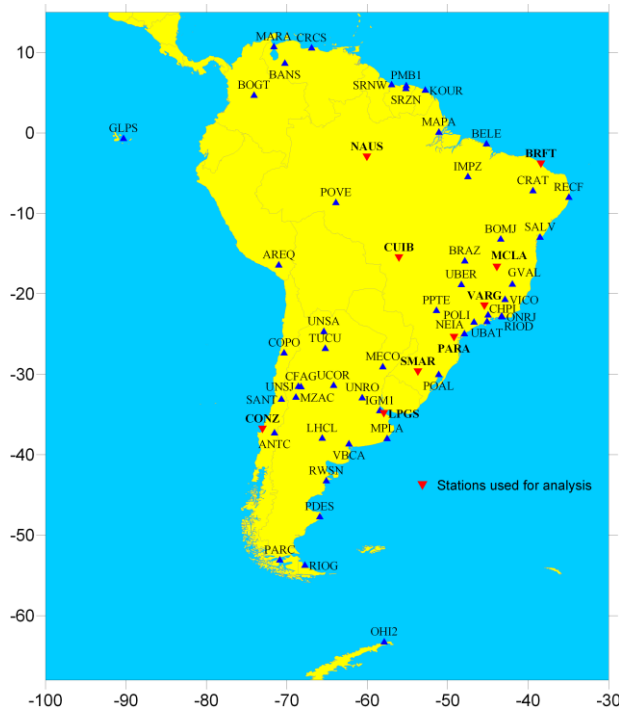


Fig. 1 – Estações GPS permanentes na América do Sul.

Tabela 1 – relação de estações, tipo de receptores e antenas usados no experimento.

ESTAÇÃO	RECEPTOR	ANTENA
BRFT	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504 NONE
CONZ	TPS E_GGD (177 e 258) JPS LEGACY (09 e 120)	TPSCR3_GGD CONE
CUIB	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 NONE
LPGS	AOA BENCHMARK ACT	AOAD/M_T NONE
MCLA	ASHTech Z-FX	ASH700700.B NONE
NAUS	TRIMBLE NETRS	TRM41249.00 NONE
PARA	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 NONE
SMAR	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 NONE
VARG	ASHTech Z-FX	ASH700700.B NONE

4 MODELO IONOSFÉRICO DE LA PLATA – LPIM

Os MRIs-AS são calculados usando o Modelo Ionosférico de La Plata (LPIM). As principais características do LPIM são os procedimentos de calibração do sTEC (*slant TEC*) e o uso da latitude *modip* para a interpolação do vTEC.

O LPIM implementa o procedimento de *de-biasing* o qual melhora a calibração dos dados em relação ao outro procedimento geralmente utilizado com esse propósito. Após a calibração, as medidas de sTEC são convertidas para vTEC e mapeadas usando o tempo local e a latitude *modip*. O uso da latitude *modip* suaviza a variabilidade espacial do vTEC, especialmente nas regiões de baixas latitudes na América do Sul, e conseqüentemente possibilita uma melhor interpolação do vTEC (Brunini et al, 2004).

Desde julho de 2005, o laboratório GESA, pertencente à Faculdade de Ciências Astronômicas e Geofísicas da Universidade de La Plata (<http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar>) calcula a cada hora o MRIs-AS no contexto de um projeto piloto para o SIRGAS.

A Figura 2 apresenta quatro imagens do mapa de ionosfera de La Plata referentes às 19 h TU dos dias 9, 120, 177 e 258 de 2006.

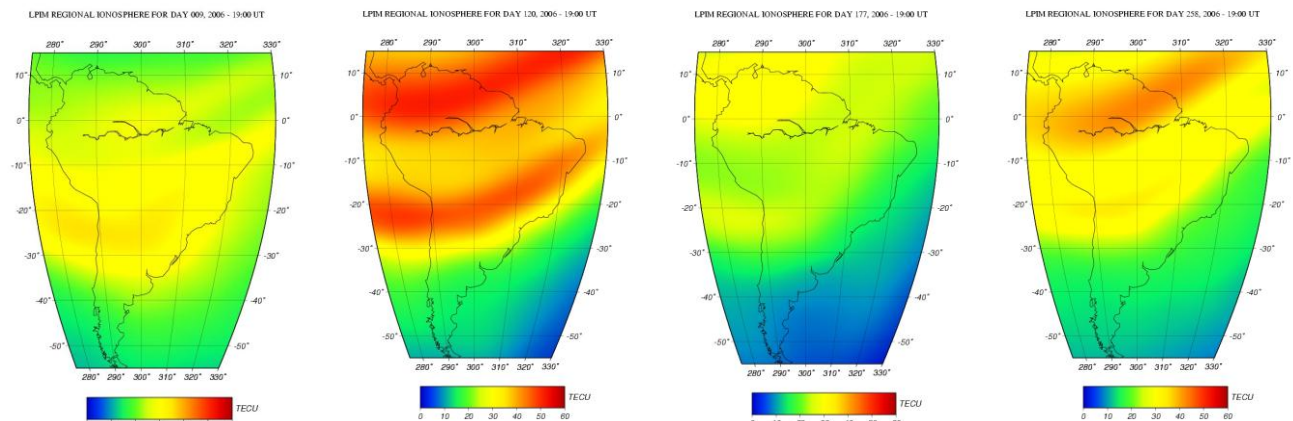


Fig. 2 – Imagens dos mapas de ionosfera de La Plata nas quatro épocas do ano 2006, utilizadas neste estudo.

Foram realizados três tipos de análises com o intuito de comparar os resultados obtidos com os mapas MRIs-AS e os GIMs IGS, sendo eles:

5 DESCRIÇÃO DOS TESTES

Os MRIs-AS e os GIMs IGS foram aplicados em diferentes execuções com dois *softwares*: CSRS *Precise Point Positioning* – PPP, desenvolvido pela Divisão de Geodésia do NRCan e o Bernese, versão 5.0, desenvolvido pela Universidade de Berna.

O software PPP processa observações GPS de receptores de uma ou duas frequências, operando no modo estático e cinemático (Tétreault P. et al.). Ele possibilita a obtenção do posicionamento preciso submetendo dados de somente uma estação. A acurácia dos resultados obtidos pelo PPP está baseada na utilização dos produtos IGS, sendo eles: órbitas, relógio e mapas de ionosfera (somente no processamento do código) e é considerado equivalente ao processamento diferencial GPS. Os dados usados no processamento com o *software* PPP foram L1 (código somente) o qual solicita o mapa de ionosfera para corrigir os atrasos ionosféricos de primeira ordem. Os dados de cada época de 2006 foram aplicados para gerar soluções com MRIs-AS de La Plata e com GIMs IGS.

O *software* Bernese é utilizado no IBGE no processamento dos dados GNSS da rede regional sul-americana utilizando-se observações dupla-frequência processadas no modo diferencial. Na resolução das ambigüidades em uma rede com linhas de base muito extensas sugere-se o uso da estratégia QIF (Quasi Ionosphere Free) juntamente com os mapas de ionosfera (Dach et al, 2007). O mesmo procedimento usado para o *software* PPP foi aplicado no Bernese, gerando dois resultados, um com os MRIs-AS e outro com o GIMs IGS. O interesse neste estudo é a quantidade de ambigüidades resolvidas nestes dois casos.

6 RESULTADOS COM O SOFTWARE PPP

(a) Análise da precisão das coordenadas em dados de 24 horas: Os resultados mostram equivalência nos resultados obtidos com MRI-AS e com os GIMs IGS (Fig. 3). Após as primeiras duas horas os desvios padrão das componentes horizontais são de aproximadamente 20 cm, e após 24 horas a precisão chega a 5 cm. O desvio padrão da componente vertical melhora 50 cm após 2 horas e chega a 15 cm após 24 horas.

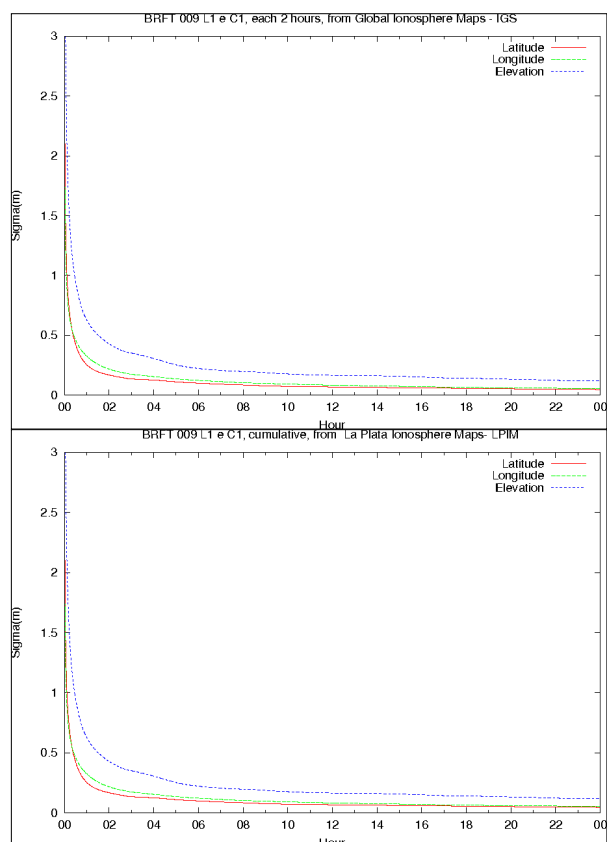


Fig. 3 – Resultados obtidos na estação BRFT 009, com os mapas GIM (acima) e MRIs-AS (abaixo) em um período de 24 horas.

(b) Análise da precisão das coordenadas em seções de 2 horas: os desvios padrão das componentes horizontais estão entre 20-30 cm e na componente vertical estão entre 50-60 cm para todas as soluções de 2 horas. Em duas estações foi observado que o desvio padrão da latitude era 10 % maior que o desvio padrão da longitude (estações La Plata e Concepción - Fig. 4). O desvio padrão da componente vertical chega a um valor máximo de 1 metro na estação de La Plata, no dia 177.

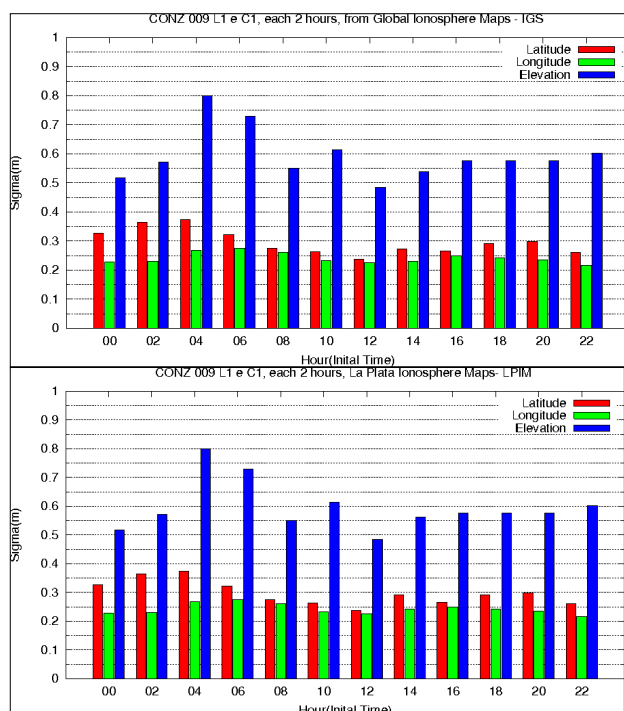


Fig. 4 – Resultados obtidos na estação CONZ 009, com os mapas GIM (acima) e MRIs-AS (abaixo), em períodos de 2 horas.

(c) Análise das diferenças entre a solução semanal IGS e as soluções obtidas com MRIs-AS e GIM: os resultados indicam uma melhor concordância das soluções obtidas com os GIMs com as soluções semanais IGS. Geralmente, após 24 horas de observação, as diferenças são da ordem de 20 cm nas componentes horizontais (Fig. 5) e um 1 metro para a componente vertical.

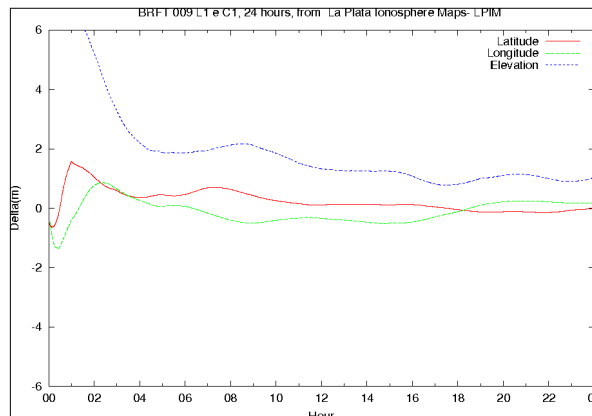
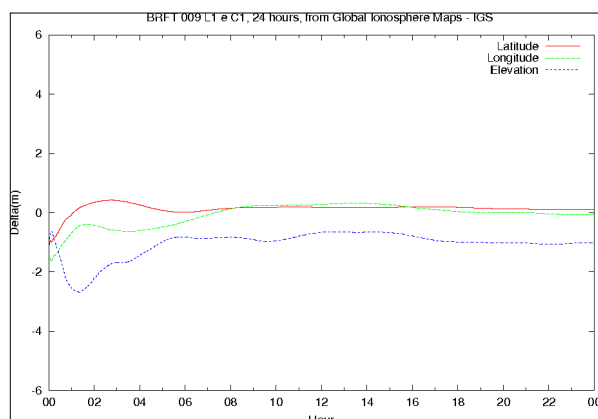


Fig. 5 – Comparação entre a solução semanal IGS e as soluções GIM (acima) MRIs-AS (abaixo) na estação BRFT 009.

7 RESULTADOS COM O SOFTWARE BERNESE

O interesse no uso do Bernese está em comparar os resultados na etapa de resolução de ambigüidades usando o mapa de ionosfera GIMs. A rede completa sul-americana foi usada nos seguintes processamentos:

(a) Resolução da ambigüidade usando a estratégia QIF sem mapa de ionosfera e a inserção das ambigüidades resolvidas na solução diária final.

(b) Resolução da ambigüidade usando a estratégia QIF com mapa de ionosfera GIMs CODE (Centro de Determinação de Órbita da Europa) e a inserção das ambigüidades resolvidas na solução diária final.

Os resultados dos testes realizados, incluindo as 59 estações na América do Sul, de acordo com as estratégias /opções mencionadas no item anterior são apresentados nas tabelas 2 e 3. A tabela 2 apresenta o número de ambigüidades antes e depois da etapa de resolução. Aplicando os GIMs CODE, mais ambigüidades são resolvidas (1% mais do que sem GIMs), isso reflete uma pequena melhoria no erro médio quadrático das linhas de base.

Tabela 2 – número de ambigüidades antes e depois da etapa de resolução, com e sem o mapa de ionosfera.

Estratégia	QIF (sem mapa de ionosfera)		QIF (com mapa GIM – CODE)	
	n° de ambigüidades	n° de ambigüidades após a resolução	n° de ambigüidades	n° de ambigüidades após a resolução
009	4454	1728 (61,2 %)	4454	1628 (63,4 %)
120	5114	1582 (69,1 %)	5114	1514 (70,4 %)
177	4652	1536 (67,0 %)	4652	1480 (68,2 %)
258	4072	1490 (63,4 %)	4072	1470 (63,9 %)

Tabela 3 – Erro médio quadrático obtido em três linhas de base (com e sem o mapa de ionosfera).

Dia	Linha de base	Dist. (km)	E.M.Q. (antes da resol. de amb.) (m)	E.M.Q. (resol. de amb.-QIF) (m)	E.M.Q. (resol. de amb.-QIF, com GIMs) (m)
-----	---------------	------------	--------------------------------------	---------------------------------	---

009	CONZ-SANT	463	0.0004	0.0003	0.0003
	NAUS-SRNW	1047	0.0008	0.0006	0.0004
	UBER-VARG	421	0.0006	0.0004	0.0004
120	CONZ-SANT	463	0.0003	0.0002	0.0002
	NAUS-SRNW	1047	0.0006	0.0004	0.0003
	UBER-VARG	421	0.0007	0.0004	0.0003
177	CONZ-SANT	463	0.0002	0.0002	0.0002
	NAUS-SRNW	1047	0.0005	0.0004	0.0003
	UBER-VARG	421	0.0006	0.0003	0.0003
258	CONZ-SANT	463	0.0003	0.0002	0.0002
	NAUS-SRNW	1047	0.0008	0.0006	0.0004
	UBER-VARG	421	0.0008	0.0005	0.0005

8 TRABALHOS FUTUROS

Os mapas de ionosfera MRI-AS e GIM IGS são necessários para o processamento dos dados de uma frequência. Neste estudo preliminar os mapas apresentaram soluções similares, mostrando que ambos são úteis para o processamento preciso por ponto.

Os trabalhos futuros se concentrarão no refinamento do mapa de La Plata, visando à obtenção de melhores resultados na solução com o PPP e na resolução de ambigüidades na solução diferencial.

Com o propósito de implementar o serviço PPP para a comunidade SIRGAS, serão estimados parâmetros de transformação entre os sistemas SIRGAS2000 e ITRF.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brunini C., Meza, A., Gende M., Azpilicueta F., South American regional ionospheric maps computed by GESA: a pilot service in the framework of the SIRGAS project. Submitted to Advances in Space Research, 2007.

Brunini, C., Van Zele, M.A., Meza, A., Gende, M. Quiet and perturbed ionospheric representation according to the electron content from GPS signals. J. Geophys. Research, 108, doi: A210.1029/2002JA009346, 2004.

Brunini, C., Meza, A., Azpilicueta, F., Van Zele, M.A., Gende, M., Diaz, A., 1994. A new ionosphere monitoring technology based on GPS. Astrophysics and Space Science, 290, 415-429.

Feltens, J., Schaer, S., 1998. IGS Products for the Ionosphere. Proc. 1998 IGS Analysis Centres Workshop, Darmstadt, 285-297.

GSD (Geodetic Survey Division - NRCAN), 2004. On-line Precise Point Positioning Project-How to Use Document, version 1.1.

PIGN, 2007. Projeto da Infra-estrutura Geoespacial Nacional. <http://www.pign.org/>.

Kouba J., Héroux P., 2001. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products, GPS Solutions, Vol. 5, N° 2, pp.12-28.

Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M., 2007. Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute University of Bern, Berna.

SIRGAS, 2007. Sistema de Referencia Geocentrico para las AméricaS, <http://www.sirgas.org/>.

Tétreault P., Kouba J., Héroux P. Legree P., 2005. CSRS-PPP: An Internet Service for GPS User Access to The Canadian Spatial Reference Frame, Revista Geomática, vol. 59, n° 1, pp. 17-28.,

6 AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao GSD do NRCAN por disponibilizar o software PPP ao IBGE e pelo apoio técnico. A CIDA (Canadian International Development Agency) provendo os recursos financeiros para concretização deste trabalho. Ao Projeto PIGN (National Geospatial Framework Project-<http://www.pign.org>) por viabilizar o intercâmbio de tecnologia entre Brasil a Canadá.