

**CENTRO DE ANÁLISE SIRGAS – IBGE: NOVAS  
ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO E COMBINAÇÃO, E  
A INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DO REFERENCIAL  
GLOBAL NOS RESULTADOS**

*SIRGAS Analysis Centre-IBGE: new processing and combination strategies and the  
influence of the global reference change in results*

SONIA MARIA ALVES COSTA  
ALBERTO LUIS DA SILVA  
MARCO AURÉLIO DE ALMEIDA LIMA  
NEWTON JOSÉ DE MOURA JÚNIOR

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia  
Av. Brasil, nº 15.671 Bloco IIIA sala 06  
Parada de Lucas - Rio de Janeiro – RJ CEP 21241-051  
Tel (5521) 2142-4929 - Fax (5521) 2142-4859  
{sonia.alves; alberto.luis; marco.almeida; newton.junior }@ibge.gov.br

**RESUMO**

Atualmente, o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) é realizado por uma rede GNSS (*Global Navigation Satellite System*) permanente denominada SIRGAS-CON, com cerca de 240 estações em funcionamento permanente, distribuídas na América do Sul, Central e Caribe. Os Centros de Análise SIRGAS foram estabelecidos com a finalidade de determinar sistematicamente as coordenadas das estações SIRGAS-CON, seguindo padrões estabelecidos internacionalmente, a fim de apoiar a manutenção do sistema e as atividades do Grupo de Trabalho SIRGAS-GT I (Sistema de Referência). Desde agosto de 2008 a Coordenação de Geodésia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE assumiu oficialmente as atividades de um Centro de Análise. Este é um trabalho cuja dedicação é crescente uma vez que o número de estações no continente Sul Americano vem aumentando rapidamente nos últimos anos. Desta atividade diária são geradas dentre outros resultados, as séries temporais das coordenadas de cada estação, possibilitando assim a determinação dos

deslocamentos das estações em função da movimentação da crosta terrestre, os movimentos locais como subsidência e/ou soerguimento crustal, causados por fenômenos naturais, como por exemplo, terremotos, além de efeitos sazonais causados por fatores diversos. Paralelamente a atividade de processamento dos dados GNSS, o IBGE também realiza semanalmente a combinação das soluções semanais dos nove Centros de Processamento SIRGAS. Esta combinação tem por objetivo comparar os resultados com os obtidos pelo DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*), o qual disponibiliza a solução final semanal da rede SIRGAS-CON. Por se tratar de resultados precisos, a mudança em alguma informação no processamento pode acarretar alterações nas coordenadas determinadas e, conseqüentemente, descontinuidades nas séries temporais de cada estação. Recentemente, em 17 de abril de 2011 (semana GPS 1632), as órbitas (finais e rápidas), as correções dos relógios dos satélites e o modelo de calibração das antenas disponibilizado pelo *International GNSS Service – IGS*, passaram a estar referidos à nova realização do IGS, denominada IGS08. Conseqüentemente, a partir dessa data, os processamentos GPS que utilizam os produtos IGS terão seus resultados referidos a este novo sistema de referência, o que poderá acarretar descontinuidades nas coordenadas. O objetivo desse trabalho é apresentar a estratégia de processamento atualmente em operação, bem com uma nova estratégia visando à melhoria dos resultados. Outro objetivo é apresentar alguns resultados do processamento e combinação semanal realizados pelo IBGE, bem como esclarecer as alterações ocorridas com a adoção da nova versão da Rede de Referência Global para soluções GNSS, o IGS08 e uma análise preliminar da conseqüência desta mudança.

**Palavras-Chave:** Rede SIRGAS-COM; Centro de Análise IBGE; IGS08.

#### ABSTRACT

Currently, the SIRGAS (Geocentric Reference System for the Americas) is performed by a permanent GNSS network called SIRGAS- CON, where there are about 240 permanent stations in operation, distributed in South, Central Americas and Caribbean region. The SIRGAS Analysis Centers were established in order to systematically determine the SIRGAS-CON station coordinates, following the standards established internationally in order to support the maintenance of the system and the activities of the SIRGAS Working Group GT-I (Reference System). Since August 2008 the Coordination of Geodesy of the Brazilian Institute of Geography and Statistics - IBGE officially took over the activities of an analysis Center. This is a kind of daily work to which higher and higher dedication is given as the number of stations in the South American continent has been increasing rapidly in the recent years. Other results are coming out; the station coordinates time series, thus enabling the determination of the station displacements due to the movement of the earth crust, local movements such as subsidence and / or local crustal uplift caused by natural phenomena such as earthquakes, as well as seasonal effects caused by several factors. At the same time, IBGE also carried out the

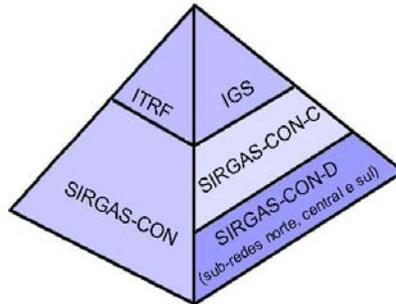
weekly combination of solutions from nine weekly SIRGAS Analysis Centers. This combination aims at comparing to the results to those obtained by DGFI (Deutsches Forschungsinstitut Geodätisches), which provides the final weekly solution from SIRGAS-CON network. Due to result accuracy, the change of any information in the processing can lead to certain changes in the coordinates and hence discontinuities in the time series of each station. Recently, on April 17, 2011 (GPS week 1632), the orbits (rapid and final fast), the corrections of the satellite clocks and model calibration of antennas provided by the International GNSS Service – IGS, started to be referred to the new IGS realization, named IGS08. Since then, thereafter, the GPS processing using IGS products will have their results referred to this new reference system, which may cause discontinuities in the coordinates. The paper aims at presenting the processing strategy currently in operation, as well as a new strategy to improve the results. Another aim is to present some results of weekly processing and combination carried out by IBGE, and also to clarify the changes with the adoption of the new version of the Global Reference Network GNSS solutions, the IGS08.

**Keywords:** SIRGAS-CON Network; Analysis Center IBGE; IGS08.

## 1. INTRODUÇÃO

A Rede SIRGAS-CON, com 240 estações localizadas nas Américas do Sul, Central e Caribe, é atualmente a realização SIRGAS (SIRGAS, 2011). Até 2008 o processamento dos dados GNSS e os resultados semanais desta rede eram desempenhados pelo DGFI, na responsabilidade do Centro Regional IGS para a América do Sul, Central e Caribe - IGS RNAAC-SIR. Com o crescente número de estações permanentes GNSS, as atividades realizadas pelo DGFI foram compartilhadas com os Centros de Análise Locais SIRGAS, os quais têm como responsabilidade o processamento diário dos dados GNSS de um determinado conjunto de estações da Rede SIRGAS-CON, bem como a disponibilização da solução semanal. A quantidade de estações é distribuída para cada centro de forma que na solução final semanal elas tenham o mesmo peso. Ao conjunto de estações processadas pelos Centros de Análise Locais SIRGAS, denomina-se rede SIRGAS-CON-D (D se referindo a “densificação”) e ao subconjunto de estações processadas pelo DGFI denomina-se rede SIRGAS-CON-C (C se referindo a “core”, em inglês núcleo). A sub-rede SIRGAS-CON-C é formada pelas estações operacionalmente mais estáveis, ou seja, aquelas que possuem dados de boa qualidade e poucas falhas, além de estarem em áreas estáveis da crosta no continente, mantendo assim a consistência e precisão do referencial ao longo do tempo. Todas as estações pertencentes a rede global IGS localizadas na porção do continente americano de abrangência do SIRGAS pertencem a rede SIRGAS-CON-C e todas estações da rede SIRGAS-CON-C pertencem a rede SIRGAS-CON-D. A Figura 1 apresenta a hierarquia das redes global IGS e regional ou continental SIRGAS-CON, com a sua respectiva divisão.

Figura 1 – Hierarquia das Redes IGS e SIRGAS-CON, com as suas divisões, a rede SIRGAS-CON-C representando o primeiro nível de densificação e a rede SIRGAS-CON-D o segundo nível de densificação na América Latina e Caribe.



A combinação das soluções semanais calculadas pelos centros de processamento locais é realizada pelo Centro de Combinação SIRGAS, sobre a responsabilidade do DFGI, gerando assim a cada semana uma solução final semanal da rede, injuncionada a solução global IGS semanal. Essa solução serve de referência para diversos trabalhos que necessitam de informação posicional, assim como permite um monitoramento de todas as estações SIRGAS-CON, servindo de subsídio para futuras realizações do sistema. Conforme apresentado na Tabela 1, atualmente participam desta tarefa oito centros de análise americanos e o DGFI.

Tabela 1 – Relação dos Centros de Análise Locais SIRGAS, responsáveis pelo processamento das estações da rede SIRGAS-CON-D.

Identificação do Centro	Instituição responsável	País
CEPGE	Centro de Procesamiento de datos GNSS del Ecuador Instituto Geográfico Militar	Equador
CIMA	Centro de Procesamiento Ingeniería-Mendoza-Argentina de la Universidad Nacional de Cuyo	Argentina
CPAGS-LUZ	Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia	Venezuela
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;	Brasil
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi	Colômbia
IGN-Ar:	Instituto Geográfico Nacional	
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía	México
SGM-Uy	Servicio Geográfico Militar	Uruguai



Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), pois é através deles que se pode monitorar as variações nas coordenadas dessas estações ocorridas por diferentes causas, tais como terremotos, subsidência ou alguma alteração física no marco. Este trabalho tem por objetivo apresentar a estratégia de processamento atualmente em uso com o software Bernese e a avaliação de uma nova estratégia de processamento visando a melhoria dos resultados, bem como uma avaliação e comparação das soluções do IBGE com outras soluções (SIRGAS-CON e IGS). Algumas questões importantes relacionadas à adoção do referencial IGS08 nos produtos IGS e à manutenção das redes nacionais permanentes GNSS são mostradas através das séries temporais das coordenadas. Para um melhor entendimento do leitor o trabalho está dividido em 8 partes. A primeira parte aborda as estratégias e modelos aplicados no processamento na solução diária da rede SIRGAS-CON. A segunda parte apresenta a nova estratégia de resolução de ambiguidades a ser aplicada nas atividades futuras do centro. A terceira parte apresenta alguns resultados obtidos com o processamento contínuo da rede. Na quarta parte é apresentada a estratégia da combinação e uma avaliação dos resultados. Nas quinta e sexta parte as mudanças com a adoção do novo referencial global GNSS, o IGS08, bem como uma avaliação preliminar dos processamentos realizados entre as semanas 1631 e 1632, quando o IGS08 passou a ser adotado oficialmente.

## 2. ESTRATÉGIAS E MODELOS USADOS NO PROCESSAMENTO

Os centros de análise utilizam *softwares* científicos, adotando no processamento modelos e estratégias recomendadas pela comunidade científica. Dos nove centros que processam os dados da Rede SIRGAS-CON, sete deles (CEPGE, CIMA, DGFI, IBGE, CPAGS-LUZ, IGAC e SGM-Uy) utilizam o software Bernese, versão 5.0, aplicando-se o modo automático BPE (*Bernese Processing Engine*) (DACH *et al.*, 2007). As principais características da estratégia de processamento atualmente em prática são: a) as duplas diferenças de fase são processadas usando a combinação linear livre da ionosfera de modo que sejam eliminados os efeitos primários da ionosfera; b) o atraso troposférico no zênite é estimado a cada 2 horas para cada estação, sendo que os desvios padrão *a priori* são aplicados com relação ao modelo Niell (NIELL, 1996) para a componente úmida; c) componente hidrostática (seca) do atraso troposférico no zênite também é modelada com Niell; d) as ambigüidades são resolvidas separadamente em cada linha de base aplicando-se a estratégia QIF (*Quasi-Ionosphere-Free*) (MERVART, 1995) e utilizando os mapas globais da ionosfera (GIM – *Global Ionosphere Maps*) disponibilizados pelo CODE (Centro de Determinação de Órbita da Europa). Também são seguidas as orientações e padrões da Associação Internacional de Geodésia (IAG) quanto ao o modelo de correção das marés terrestre, apresentados em IERS Conventions 2003 (MCCARTHY AND PETIT, 2004), e o modelo de carga oceânica FES2004. São utilizados também as órbitas finais e parâmetros de orientação terrestre disponibilizados pelo IGS, bem como os modelos de correção absoluta do centro de fase das antenas (satélites e receptores). Até o presente

momento foram utilizados dois modelos de correção absoluta do centro de fase: o igs05\_1499.atx (SCHMID *et al.*, 2007) até a semana GPS 1631 e o igs08.atx a partir da semana GPS 1632 (17 de abril de 2011) (IGSmail-6354, 2011). As informações sobre cada estação, tais como, o tipo de receptor/antena e a altura da antena (tomada a partir do seu ponto de referência) são informações importantes no processamento e devem ser os mesmos adotados por todos os centros de análise. O processamento é realizado duas semanas após a coleta dos dados ou quando houver a disponibilidade das órbitas finais IGS. Os resultados semanais da rede são obtidos através da combinação semi-livre fracamente injuncionadas (*loosely constraint solutions*), das soluções dos sete dias da semana, os quais são alinhados ou ajustados à rede de referência global IGS ponderando-se as coordenadas de todas as estações com 1 metro. Estes resultados são disponibilizados ao DGFI no formato SINEX (**S**oftware **I**ndependent **E**Xchange **F**ormat) (IERS, 2012) ao final da terceira semana após a disponibilização das observações GNSS. Os arquivos SINEX da solução semanal contêm as coordenadas, a respectiva matriz variância-covariância (MVC), além de algumas informações estatísticas, tais como número de observações, número de incógnitas, variância da unidade de peso *a posteriori*. A Tabela 2 apresenta as principais estratégias e modelos adotados no processamento com o Bernese realizado pelo IBGE.

Tabela 2 – Principais estratégias e modelos usados no processamento IBGE.

Informação	Estratégias / modelos
Observações	Dupla Diferença de fase
Software	Bernese 5.0 (modo BPE)
intervalo de processamento	30 segundos
Ângulo de Elevação	03°
Estratégia de Linha de Base	OBS-MAX (n° máximo de obs.)
Órbita/EOP	final IGS
Modelo de Troposfera <i>a priori</i>	Niell componente seca
Troposfera local	O atraso troposférico no zênite é estimado a cada 2 horas. São estimadas 12 correções diárias por estação. As correções dos atrasos zenitais são calculadas utilizando a função de mapeamento Niell (componente úmida).
Ambigüidades	Estratégia QIF com Modelos Globais da Ionosfera - GIM disponibilizados pelo Centro de Determinação de Órbita da Europa – CODE (Continua...)

Modelo de Marés Terrestres	IERS Conventions 2003
Modelo de Carga Oceânica	FES2004
Modelos de Correções de Centro de Fase (absoluto)	IGS_05.ATX (semanas GPS 1495 a 1631) IGS_08.ATX (a partir da semana 1632)
Coordenadas e Velocidades <i>a priori</i>	IGS05_R (semanas GPS 1495 a 1631) IGS08_R(a partir da semana 1632)
Soluções Diárias	Todas as estações são injuncionadas em $\sigma = 1m$ Arquivos de saída: SINEX  Mapas Troposféricos
Soluções Semanais	Todas as estações são injuncionadas em $\sigma=1m$ Arquivos de saída: SINEX

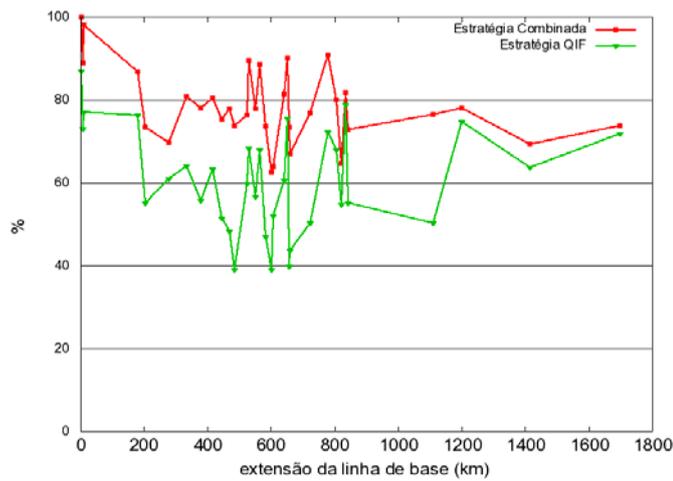
### 3. NOVA ESTRATÉGIA DE RESOLUÇÃO DAS AMBIGÜIDADES

Nos últimos anos, os métodos e modelos para análise dos dados GNSS tem melhorado continuamente, como por exemplo, atualizações de modelo de troposfera e melhorias na estratégia de resolução das ambigüidades. Sendo assim, com o propósito de obter resultados de melhor qualidade nas soluções da rede SIRGAS-CON foi implementada de forma experimental uma nova estratégia de resolução das ambigüidades a mesma aplicada por Steigenberger *et al.*,2011. A nova proposta de resolução das ambigüidades faz uso de quatro estratégias diferentes, as quais são aplicadas em função do comprimento da linha de base. As estratégias de resolução de ambigüidades são: a) Melbourne-Wüebbena, para linhas de base com extensão entre 6000 a 2000 km (WÜBBENA, 1985); QIF, para linhas de base com extensão entre 2000 a 200 km (MERVART,1995); *widelane* (L5/L3), para linhas de base com extensão entre 200 a 20 km (TEUNISSEN AND KLEUSBERG,1998); *narowlane* (L1/L2), para linhas de base menores que 20 km. Visando avaliar os resultados obtidos com a nova proposta, foi selecionada uma rede no Brasil com 37 estações cujas distâncias entre elas variam de 2 a 1.800 km. Esta rede é apresentada na Figura 3. Os dados da semana 1635 (maio de 2011) foram usados neste teste. O percentual de ambigüidades resolvidas pela estratégia proposta forma comparados com os obtidos na estratégia QIF (atualmente em uso pelo IBGE). Constatou-se que a melhoria na quantidade de ambigüidades resolvidas nas sessões de 24 horas foi de 18% a 20%, o que, conseqüentemente, melhora a qualidade das soluções diárias. Estes resultados são apresentados na Figura 4, onde observa-se uma maior quantidade de linhas entre 400 e 700 km, as quais tinham em média 50% das ambigüidades resolvidas com a estratégia QIF e passaram a ter 70% com a aplicação da nova estratégia.

Figura 3 – Rede teste usada na avaliação da nova estratégia de resolução das ambigüidades.



Figura 4 – Percentual de ambigüidades resolvidas em diferentes comprimentos de linhas de base. A linha verde apresenta o percentual aplicando-se a estratégia QIF e a linha em vermelho a nova estratégia proposta.



#### 4. RESULTADOS DO PROCESSAMENTO SEMANAL

O processamento sistemático das estações pertencentes à rede SIRGAS-CON gera, dentre outras informações, as séries temporais das coordenadas para cada estação. É através destas séries que se pode avaliar o comportamento das coordenadas das estações ao longo do tempo e detectar possíveis problemas ou descontinuidades, bem como avaliar os efeitos sazonais que ocorrem na componente vertical, assim como, determinar as velocidades das estações devido ao movimento das placas litosféricas. Resultados interessantes foram obtidos devido ao terremoto do Chile, em fevereiro de 2010, que acarretou um deslocamento leste-oeste de 3 metros nas coordenadas da estação Concepción e poucos centímetros em outras estações no Chile e Argentina entre os paralelos  $-30^{\circ}$  e  $-40^{\circ}$ . A tabela 3 apresenta esses deslocamentos horizontais. Observa-se nesta tabela que as coordenadas das estações próximas ao Oceano Atlântico tiveram variação centimétrica, como por exemplo Baía Blanca (VBCA), que teve um deslocamento de 3,6 cm.

Tabela 3 – Deslocamento horizontal das coordenadas em estações no Chile e Argentina devido ao terremoto no Chile.

<b>Estação</b>	<b>Local</b>	<b>Distância do epicentro (km)</b>	<b>Desloc. Horizontal (cm)</b>
CONZ	Concepción – Chile	115	297,8
SANT	Santiago – Chile	325	28,4
MZAS	San Rafael – Arg.	415	20,5
MZAC	Mendoza – Arg	460	11,6
MZAE	Santa Rosa – Arg.	490	11,0
VALP	Valparaiso – Chile	290	7,7
LHCL	Lihuel Calel – Arg.	700	7,4
SL01	La Punta – Arg.	650	6,7
SRLP	Santa Rosa – Arg.	780	6,2
CSLO	Leoncito – Arg.	520	4,4
CFAG	Caucete – Arg.	610	4,0
VBCA	Bahia Blanca – Arg.	1000	3,6
UNSJ	Salta – Arg.	600	3,3
BRASIL		0,5 a 1,5 cm	

Outros fatores, como por exemplo, a subsidência, a acomodação do solo, e os efeitos sazonais, podem ser detectados no processamento sistemático das estações GNSS. Um exemplo é o que ocorre nas estações da Região Amazônica, cujas altitudes sofrem variação anual de poucos centímetros na altitude devido à hidrologia continental. A maior amplitude foi constatada na região de Manaus e é da ordem de 7 a 8 cm ao ano. A Figura 4 apresenta duas curvas: a vermelha representando a série temporal da altitude obtida pela estação GNSS, enquanto a curva azul representa a série temporal do nível d'água do Rio Amazonas, obtida da

estação limimétrica da ANA (Agência Nacional de Águas) 14990000, entre os anos 2007 a 2010. À distância entre as estações GPS e ANA é de aproximadamente 13 km. Observa-se nesta figura que quando o nível da água do rio atinge o seu valor máximo a crosta responde contrariamente a carga da massa d'água reduzindo assim o valor da altitude da estação GPS. Esta resposta é praticamente imediata, estando os dois ciclos praticamente em fase. A anti-correlação entre estas duas observações é muito forte, sendo da ordem de 0.9, conforme apresentado na Figura 5. Esta mesma variação sazonal também é observada em outras estações na Amazônia, como por exemplo, em Porto Velho, conforme apresentado na Figura 6. Resultados semelhantes foram apresentados por Bevis et al. (2005), na estação GPS MANU, localizada em Manaus. Entretanto, no trabalho de Bevis foi utilizado um modelo hidrológico ao invés de dados in-situ para esta avaliação. Semelhante variação sazonal na componente vertical também é observada em estações localizadas nas regiões centro-oeste e sudeste, necessitando ainda uma maior investigação sobre o assunto.

Figura 5 – À esquerda, série temporal da variação do nível d'água do Rio Amazonas obtida na estação da ANA 14990000 e da altitude geométrica, obtida na estação GPS NAUS, para o período de 2007 a 2010. À direita, reta de regressão representando a forte anti-correlação entre os dados das estações GPS (NAUS) e ANA(14990000).

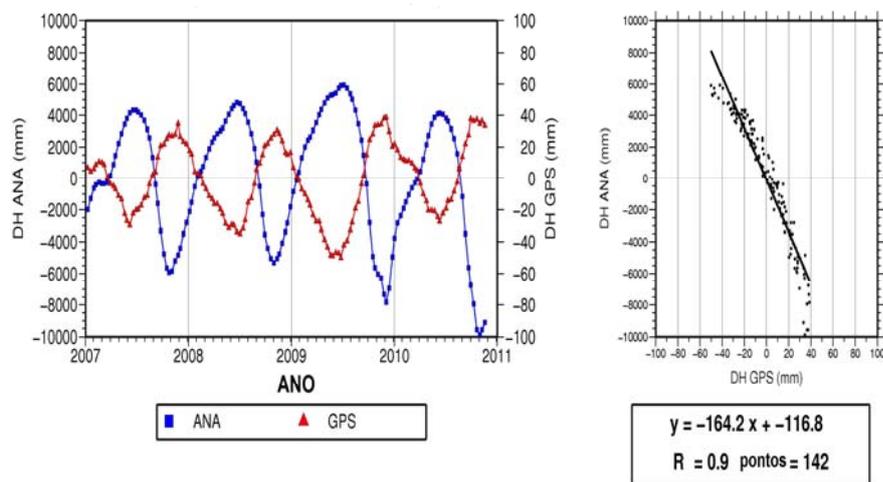
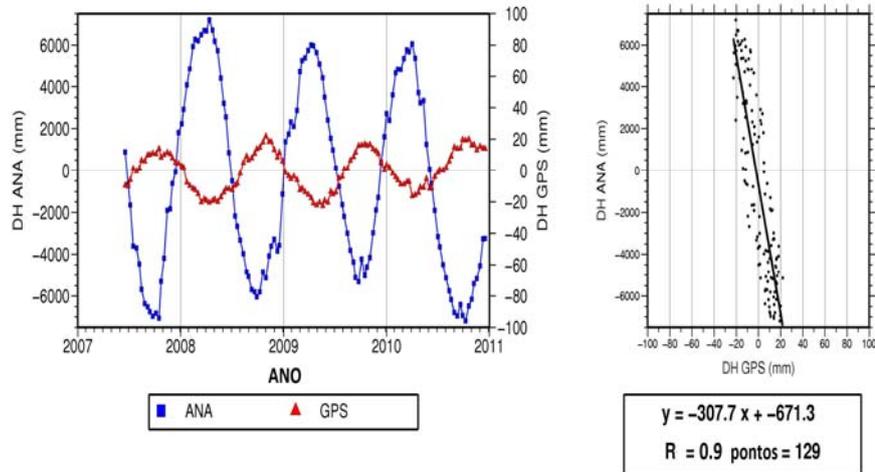


Figura 6 – À esquerda, série temporal da variação do nível d'água do Rio Madeira obtida na estação da ANA 15490000 e da altitude geométrica, obtida na estação GPS POVE, para o período de 2007 a 2010. À direita, reta de regressão representando a forte anti-correlação entre os dados das estações GPS (POVE) e ANA(15490000).



## 5. COMBINAÇÃO SEMANAL DA REDE SIRGAS-CON (ESTRATÉGIA E RESULTADOS)

Conforme mencionado anteriormente, o DGFI é a instituição responsável pela disponibilização da solução semanal da Rede SIRGAS-CON ao IGS, ou seja, uma vez disponibilizada a solução fracamente injuncionada de cada centro de análise, estas soluções são combinadas e alinhadas à rede de referência IGS. Em 2008 o IBGE também assumiu a tarefa da combinação de forma complementar e comparativa com os resultados obtidos pelo DGFI. O software utilizado na combinação também é o Bernese e a estratégia aplicada na combinação das soluções semanais dos centros de Análise é a mesma adotada pelo DGFI. Os resultados são disponibilizados no servidor de FTP do IBGE (<ftp://geofp.ibge.gov.br/SIRGAS/Resultados/Combinacao>) ao final da semana seguinte à disponibilização das soluções de cada centro de análise. A estratégia aplicada na combinação das soluções semanais dos nove centros de análise é a seguinte:

- (1) Remover as injunções das soluções fracamente injuncionadas de cada centro de análise, gerando assim as equações normais livres ou sem injunções;
- (2) A solução de cada centro de processamento é alinhada individualmente através da estratégia de injunção mínima a um conjunto de estações

pertencentes à rede de referência global IGS08 aplicando-se as condições de rede sem rotação e rede sem translação. As estações IGS usadas na definição do referencial são: BOGT (Bogotá, Colômbia), BRAZ (Brasília, Brasil), BRFT (Euzébio, Brasil), BRMU (Bermuda, UK), CONZ (Concepcion, Chile), CRO1 (Saint Croix, USA), GLPS (Puerto Ayora, Equador), GOLD (Goldstone, USA), GUAT (Guatemala, Guatemala), ISPA (Easter Island, Chile), LPGS (La Plata, Argentina), MDO1 (Fort Davis, USA), OHI2 (O'higgins, Antártica), PALM (Palmer, Antártica), PARC (Punta Arenas, Chile), SCUB (Santiago de Cuba, Cuba), UNSA (Salta, Argentina) e VESL (Sanae. Veslesk, Antártica);

- (3) Verificar se existem problemas com a identificação de receptor/antena, bem como a altura da antena. Todas estações devem possuir as mesmas configurações nas soluções de cada centro;
- (4) As coordenadas obtidas na etapa (2) em cada centro de processamento são comparadas com a solução semanal IGS e entre elas para identificar possíveis resíduos altos. As estações com resíduos maiores que 10 mm nas componentes horizontais e 20 mm na componente vertical serão analisadas e possivelmente retiradas da solução. No caso da exclusão de alguma estação as etapas (3) e (4) serão repetidas visando o refinamento da solução final e conseqüentemente da estimativa do fator de variância;
- (5) A matriz covariância de cada solução é escalada pelo seu fator de variância;
- (6) As equações normais livres de cada solução são combinadas para produzir a solução fracamente injuncionada aplicando-se peso de 1 metro nas coordenadas de todas as estações. O arquivo de saída desta solução é: IBGwwwS.SNX;
- (7) As equações normais livres de cada solução são combinadas para produzir a solução injuncionada aplicando-se peso de  $1E-04$  metros nas mesmas estações da etapa (2). O arquivo de saída desta solução é: IBGyyPwww.SNX. (www = semana GPS; yy = ano)

As soluções combinadas entre as semanas GPS 1495 a 1631 foram injuncionadas na solução semanal global IGS05. A partir da semana 1632 as soluções combinadas foram injuncionadas na solução semanal global IGS08, compatibilizando assim estas soluções com as órbitas adotadas no processamento. Além dos arquivos SINEX, o IBGE também disponibiliza em (<ftp://geoftp.ibge.gov.br/SIRGAS/Relatorios/Combinacao>) os relatórios semanais referentes a solução de cada semana. Apesar da Rede SIRGAS-CON possuir oficialmente 240 estações, nas últimas 10 semanas participou da combinação 225 estações, 15 estações não estão em operação.

A fim de se avaliar os resultados semanais da combinação realizada pelo IBGE, foram realizadas comparações entre as soluções semanais do IGS e do DGFI,

identificada por SIR. A Figura 7 apresenta o erro médio quadrático (EMQ) dos resíduos obtidos nas três componentes (Norte, Leste e Vertical) calculados entre as soluções semanais das estações de referência IGS e as soluções semanais IBG. A Figura 8 apresenta o erro médio quadrático dos resíduos obtidos nas três componentes (norte, leste e vertical) calculados entre as soluções semanais SIR e IBG. Ambas as comparações mostram que os resultados do IBGE têm uma aderência com a solução de rede global e regional, pois em média o EMQ estimado para as componentes horizontais (Norte e Leste) na Figura 7 é de 2 mm e na componente vertical é da ordem de 4 mm. Na Figura 8 estes valores são ainda melhores, chegando a 0.5 mm nas componentes horizontais e 1.5 mm na componente vertical. Os valores do EMQ na comparação de uma solução global são maiores devido ao que se chama de “efeito de rede”. O “efeito de rede” é decorrente da diferença de configurações entre a rede global IGS e regional SIRGAS-CON.

Figura 7 – Erro médio quadrático dos resíduos obtidos nas três componentes (Norte, Leste e Vertical), através da comparação semanal (semanas GPS 1495 a 1647) das coordenadas das estações de referência IGS (IGSyPwww.SNX) e a solução IBGE (IBGyPwww.SNX).

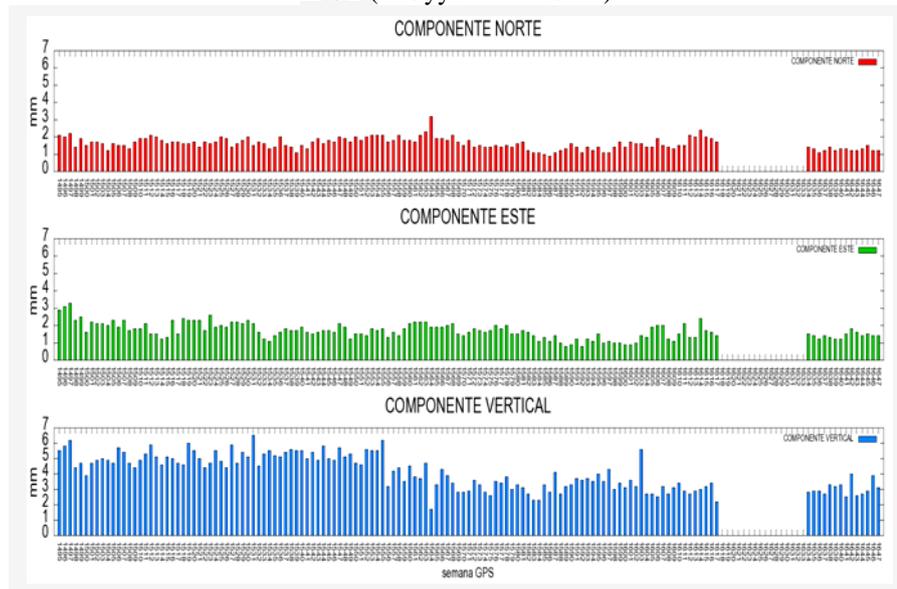
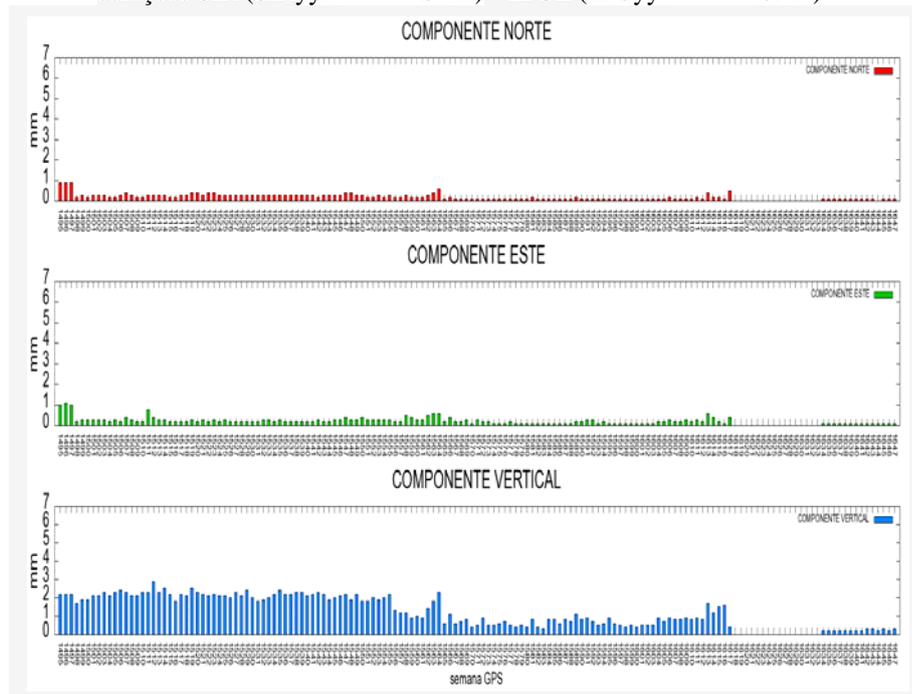


Figura 8 – Erro médio quadrático dos resíduos obtidos nas três componentes (norte, leste e vertical), através da comparação semanal (semanas GPS 1495 a 1647) das soluções SIR (SIRyyPwww.SNX) e IBGE (IBGyyPwww.SNX).



Outra avaliação realizada foi através da série temporal dos parâmetros de transformação estimados entre as soluções semanais do IBGE e as soluções semanais IGS e SIR, com o intuito de se avaliar a consistência externa da combinação do IBGE com soluções global e regional. Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas as três translações segundo os eixos x, y e z, as três rotações e a escala. Conforme apresentado na Figura 10, a escala e rotações possuem valores muito pequenos, da ordem de 0.01 miliarcsec e 10-4 mm/km, respectivamente. Observa-se no gráfico da escala da Figura 9 uma tendência sazonal, a qual poderá estar associada à calibração do centro de fase das antenas (satélite e receptor) devido à forte correlação entre estas duas informações. Informações sobre as alterações nas calibrações das antenas e suas conseqüências na definição dos referenciais GNSS serão tratadas na seção 6. Houve uma melhoria significativa nos resultados, principalmente nas translações, após a semana 1617, uma vez que as soluções semanais do IBGE passaram a ter o referencial definido pelas mesmas estações adotadas na solução SIR.

Figura 9 – Série temporal dos parâmetros de transformação estimados entre as soluções semanais IGS IGSyPwww.SNX e IBGE (IBGyPwww.SNX).

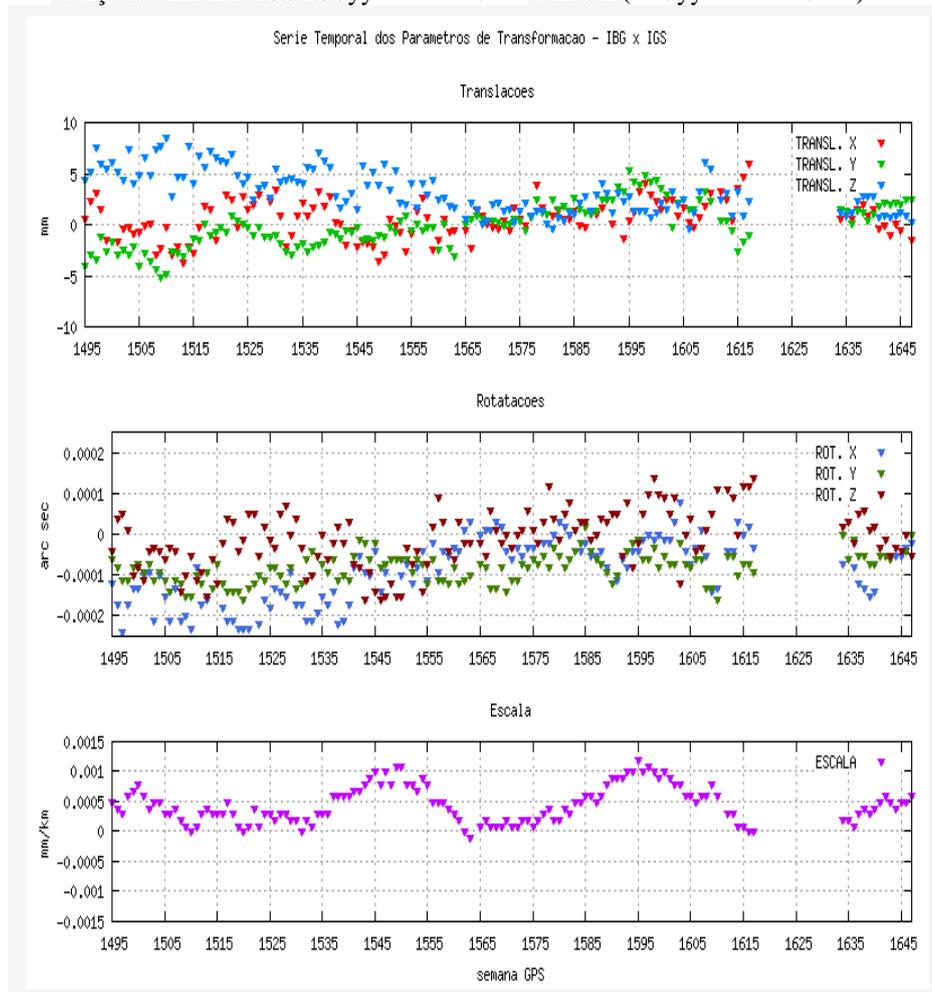
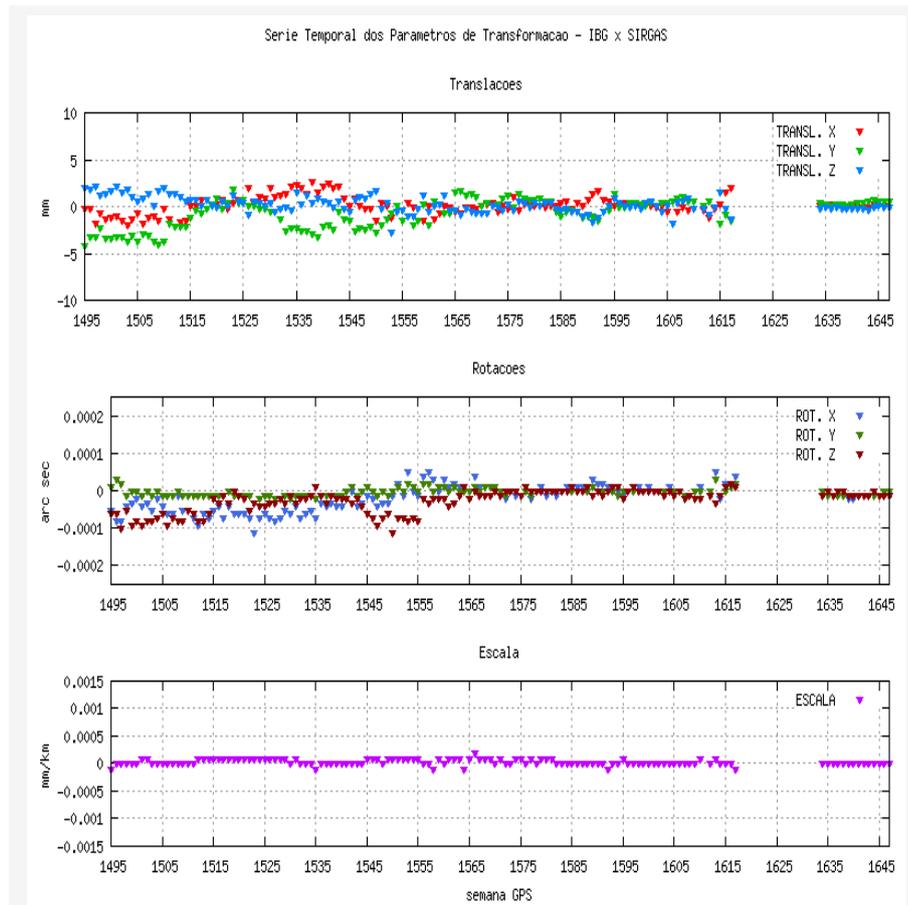


Figura 10 – Série temporal dos parâmetros de transformação estimados entre as soluções semanais SIR SIRyyPwww.SNX e IBGE (IBGyyPwww.SNX).



## 6. REDES DE REFERÊNCIA IGS E AS MUDANÇAS OCORRIDAS ENTRE AS REALIZAÇÕES IGS05 E IGS08

O IGS é um serviço internacional o qual conta com a contribuição de centenas de agências e instituições científicas no mundo todo (IGS, 2011). A finalidade do IGS é a definição e manutenção de uma rede de referência global de estações contínuas GNSS. Uma realização IGS consiste basicamente na determinação de um conjunto de novas coordenadas para as estações que compõem esta rede de referência, as quais são calculadas para uma determinada época. Desde a realização IGS97, o IGS tem usado as suas próprias realizações no cálculo de seus produtos, sendo que antes dessa data o IGS utilizava as realizações do ITRF (REBISCHUNG

*et al.*, 2011). Dentre os produtos IGS, podemos citar as órbitas rápidas e finais dos satélites e seus respectivos parâmetros de orientação da Terra, correções do erro dos relógios dos satélites e arquivos de centro de fase das antenas. A Tabela 4 apresenta as diferentes realizações utilizadas pelos produtos IGS a partir do ano 2000.

Tabela 4 – Realizações IGS (fonte: <http://acc.igs.org/igs-frames.html>.)

Realização IGS	Semana GPS	Período	Época de referência	n° de estações de referência
IGS97	1065 – 1142	4 junho 2000 – 1 Dez 2001	01/01/1997	51 (ITRF97)
IGS00	1143 – 1252	02 Dez. 2001 – 10 Jan. 2004	01/01/2000	54 (ITRF2000)
IGS00b	1253 – 1399	11 Jan. 2004 – 04 Nov. 2006	01/01/1998	99 (ITRF2000)
IGS05	1400 – 1631	05 Nov. 2006 – 16 abril 2011	01/01/2000	130 (ITRF2005)
IGS08	1632	17 abril 2011	01/01/2005	232 (ITRF2008) 91 (ITRF2008) rede principal

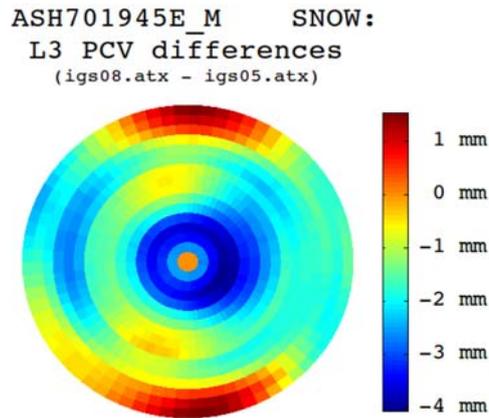
Atualmente, 232 estações GNSS permanentes equipadas com receptores de dupla frequência de boa qualidade e integridade dos dados, compõem a rede IGS08, as quais disponibilizam seus dados aos centros de análises IGS para a geração de produtos IGS (rápidos e finais), sendo futuramente utilizados pelos usuários das técnicas de posicionamento espacial, como por exemplo, o GPS (IGS, 2011). A realização IGS08 esta materializada por um conjunto de 65 estações GNSS pertencentes à realização ITRF2008. Os critérios usados para a seleção das 232 estações foram:

- (a) a localização geográfica da estação, de preferência em regiões estáveis geologicamente;
- (b) a qualidade de suas coordenadas na solução ITRF2008, uma vez que estas estações seriam utilizadas como referências na definição do referencial IGS08;
- (c) estações cujas calibrações do centro de fase (absoluto) das antenas foram realizadas com robô, ou estações com equipamentos que também rastreiam os satélites da constelação GLONASS, ou estações cujo equipamento está ligado a um padrão externo atômico de frequência.

Nas transições entre versões anteriores da rede IGS na maioria das vezes ocorriam descontinuidades nas séries temporais das coordenadas decorrentes da troca de equipamentos (causa de origem local), mudança do modelo de calibração de antenas relativo para absoluto, entre outras. Por exemplo, até (e durante) a versão do IGS00b somente as calibrações relativas do centro de fase dos receptores eram aplicadas. Na versão posterior, no IGS05, as calibrações absolutas do centro de fase foram aplicadas aos receptores e satélites (igs05.atx). A realização IGS05 foi também usada na primeira campanha de reprocessamento de dados GNSS. Neste contexto, conhecendo os problemas ocorridos nas versões anteriores, à transição do IGS05 para IGS08 seria mais complexa devido aos seguintes fatos:

- (d) uma redução de estações de referência devido às descontinuidades causadas pela troca de equipamentos ou devido à terremotos, impossibilitando o uso destas estações na materialização do referencial;
- (e) uma distribuição geográfica heterogênea de estações (mais estações no hemisfério norte do que no sul);
- (f) calibrações mais precisas de antenas (receptores) foram estimadas pelo método robô e com estes novos valores de calibração foi criado um novo modelo denominado igs08.atx. Entretanto, o ITRF2008 foi calculado usando soluções semanais baseadas nas antigas calibrações de antenas disponíveis na solução da campanha repro1. A Figura 11 apresenta a diferença entre os valores de variação de centro de fase para a frequência combinada L3 entre os arquivos igs08.atx e igs05.atx para a antena ASH701945E\_M SNOW.
- (g) os valores de calibração do centro de fase dos satélites GNSS também foram revistos. No caso do GNSS, as variações dos centros de fase dos satélites na direção radial (z-PCOs) têm uma forte correlação com a escala do referencial. Como a escala do IGS08 difere aproximadamente -1 ppb do IGS05 (devido a mudança de ITRF2005 para ITRF2008), novos valores de calibração foram estimados para todos satélites GPS e GLONASS e incluídos no modelo igs08.atx. Informações mais detalhadas sob as mudanças nas calibrações do centro de fase dos satélites e receptores podem ser encontradas no IGSmail-6355.

Para solucionar o problema das descontinuidades nas coordenadas das estações, foi criado um arquivo (soln\_IGS08.snx) informando a época de ocorrência da descontinuidade e sua causa. Quando necessário este arquivo passa por freqüentes atualizações. No caso da descontinuidade na coordenada da estação ser causada pela troca do equipamento, a velocidade é mantida, alterando somente o valor das coordenadas.

Figura 11 – Diferença PCV: igs08 x igs05 (REBISCHUNG *et. al.*, 2011).

A heterogeneidade da rede foi resolvida com a seleção de 91 estações globalmente distribuídas de forma homogênea, as quais compõem a realização IGS08-Core, sendo usada principalmente no cálculo semanal dos produtos IGS.

Considerando que as coordenadas ITRF2008 são consistentes com as calibrações igs05.atx e o IGS08 consistente com o novo conjunto de valores de calibração igs08.atx, uma solução precisava ser encontrada para atenuar os impactos decorrentes da mudança dos modelos de calibração de antenas e garantir a consistência do IGS08 e igs08.atx. Com este objetivo, uma grande quantidade de processamentos PPP (Precise Point Positioning) foi realizada com os novos valores de calibração. As diferenças de coordenadas encontradas entre estas soluções PPP e o ITRF2008 foram aplicadas nas coordenadas ITRF2008 de 65 estações GNSS. As coordenadas das demais estações GNSS presentes no ITRF2008 (167) não foram alteradas (IGSmail-6354, 2011).

## 7. ANÁLISE PRELIMINAR DAS SOLUÇÕES IBGE EM IGS08

Até a semana GPS 1631, todas as soluções determinadas pelo centro de processamento IBGE estavam referidas à materialização IGS05 e as variações do centro de fase das antenas dos satélites e receptores ao igs05.atx. Ressalta-se que as campanhas em que os períodos correspondem às materializações IGS00 e IGb00 foram reprocessadas considerando o IGS05 para a definição do referencial. A partir da semana 1632 as soluções do IBGE passaram a estar referidas ao IGS08 e as variações de centro de fase ao igs08.atx.

A Tabela 5 apresenta o EMQ das diferenças entre os conjuntos de coordenadas determinadas para cada semana, quando comparado com a semana anterior nas componentes norte, este e vertical. Essas diferenças englobam cinco semanas antes e cinco semanas após a mudança do referencial de IGS05 para IGS08.

Tabela 5 – EMQ das diferenças entre as soluções

Semana GPS		N (mm)	E (mm)	V (mm)
1627	1628	2,1	2,3	4,6
1628	1629	1,9	2,1	5,6
1629	1630	4,9	2,2	6,2
1630	1631	2,3	1,9	5,0
<b>1631</b>	<b>1632</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>12,6</b>
1632	1633	2,0	4,2	5,1
1633	1634	2,7	1,5	5,3
1634	1635	1,6	2,0	4,4
1635	1636	2,0	3,3	5,2

Nota-se que o EMQ das diferenças entre as soluções semanais 1631 e 1632 foram as que apresentaram os maiores valores para a componente altimétrica (vertical), 12,6 mm. Isso provavelmente foi devido à utilização de diferentes valores de variação de centro de fase, uma vez que no processamento da semana 1631 foi utilizado o igs05.atx, enquanto que na solução 1632 foi utilizado o igs08.atx. Com relação às componentes planimétricas norte e leste, não foram constatadas variações significativas entre as soluções semanais.

## 8. CONCLUSÃO

A rede de estações GNSS ativas SIRGAS-CON é de vital importância para manutenção do referencial SIRGAS, o qual uma grande parte dos países sul-americanos adotaram nos seus trabalhos de Cartografia e Geodésia. Sendo assim, o processamento contínuo dos dados das estações que realizam esta rede de referência visa garantir o controle de qualidade de cada estação que participa desta rede de referência.

Em decorrência dos resultados apresentados na Figura 4, a nova estratégia de resolução de ambigüidades, deverá ser implementada nos processamentos diários em 2012. Novos estudos também serão realizados na melhoria do cálculo das correções troposféricas, como por exemplo, a aplicação do modelo GMF (*Global Mapping Function*), atualmente implementado no processamento de vários centros de análise da Europa e América do Norte.

Até o momento, as velocidades estimadas pelos centros de análise em geral, são tratadas tendo um comportamento linear, o que na verdade não ocorre em todos os casos. Com o avanço tecnológico e implementação de novos modelos matemáticos com o propósito de melhorar os resultados das redes permanentes GNSS, questões vem sendo levantadas internacionalmente sobre uma possível solução visando considerar as variações sazonais da crosta na estimativa das velocidades das estações. Os resultados citados neste trabalho identificam que estas variações sazonais na componente vertical não estão restritas somente a região

Amazônica, sendo grande parte do Brasil continental também afetado desta variação.

Os resultados evidenciados da combinação semanal da rede SIRGAS-CON são consistentes com os mesmos estimados pelo DGFI. Na última reunião do SIRGAS (SIRGAS, 2011), foi acordado que o IBGE passará a assumir as atividades de centro oficial de combinação a partir de janeiro de 2012.

De acordo com o estudo preliminar, cujo objetivo é avaliar os impactos na mudança dos referenciais globais IGS05 para IGS08 (juntamente com a utilização de novos valores de calibração do centro de fase para as antenas) nas soluções semanais do IBGE, identificou-se que a maior influência foi de aproximadamente 1 cm no EMQ da componente altimétrica. Os maiores resíduos foram observados nas estações VICO e BRFT. No caso das componentes planimétricas, essa influência não ficou bem evidenciada ao analisar o EMQ das diferenças entre as soluções semanais. Entretanto, trata-se de uma análise preliminar, havendo a necessidade de um conjunto maior de dados para um estudo mais aprofundado.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEVIS, M.; ALSDORF, D.; KENDRICK, E.; FORTES, L. P.; FORSBURG, B.; SMALLEY, R.; AND BECKER, J. (2005). *Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response*, Geophysical Research Letters, 32, L16308, doi:10.1029/2005GL023491.
- DACH, R.; U. HUGENTOBLE; P. FRIDEZ; M. MEINDL. (2007). *Bernese GPS Software Version 5.0 – Documentation*. Astronomical Institute, University of Berne, January, 640 Pp.
- IBGE. (2011) Centro de Processamento SIRGAS IBGE, [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/centros\\_apres.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/centros_apres.shtm), último acesso: 20/09/2011.
- IERS. (2012) IERS Working Group on SINEX Format, <http://www.iers.org/IERS/EN/Organization/WorkingGroups/SINEX/SINEX.html>, ultimo acesso: 14/02/2012.
- IGS. (2011). International GNSS Service Tracking Network. <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>. último acesso: 20/09/2011.
- IGSMail-6354. (2011). International GNSS Service, <http://igsb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/006354.html>, último acesso: 20/09/2011.
- IGSMail-6355. (2011). International GNSS Service, <http://igsb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/006355.html>, último acesso: 20/09/2011.
- MCCARTHY, D.D. AND G. PETIT. (2004). *IERS Conventions 2003*, IERS Technical Note 32, Bundesamt.für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- MERVART L. (1995). *Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System*. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, 53, Zürich, Switzerland.
- NIELL, A. E. (1996). *Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths*, Journal of Geophysical Research, 101(B2), pp. 3227–3246.

- REBISCHUNG, P.; GARAYT, B.; SCHMID, R.; RAY, J.; COLLILIEUX, X. (2011). *Elaboration, consequences and maintenance of the IGS realization of ITRF2008*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU2011, pp. 6850, EGU General Assembly, 03-08 abril, 2011, Vienna.
- SIRGAS. (2011). Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, Red SIRGAS-CON, <http://www.sirgas.org> último acesso: 20/09/2011.
- SCHMID, R.; STEIGENBERGER, P.; GENDT, G.; GE, M.; ROTHACHER M. (2007). *Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas*. Journal of Geodesy 81(12), pp.781-798, doi:10.1007/s00190-007-0148-y.
- STEIGENBERGER, P.; LUTZ S.; DACH, R.; HUGENTOBLE, U. (2011). *CODE Contribution to the First IGS Reprocessing Campaign. Technical Report*, <http://www.bernese.unibe.ch/publist/publist.html>.
- WÜBBENA, G. (1985). *Software Developments for Geodetic Positioning with GPS using TI-4100 Code and Carrier Measurements*. In: Goad C (ed) Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, U.S. Department of Commerce, Rockville, Maryland, pp 403-412.

(Recebido em outubro de 2011. Aceito em março de 2012).