

# INTEGRAÇÃO DA REDE GEODÉSICA BRASILEIRA NO SIRGAS

## - RESULTADOS PRELIMINARES -

**Sonia Maria Alves Costa**

**Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**

Av. Brasil 15671, Parada de Lucas, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 21241-000

e-mail: soniamaria@ibge.gov.br

### RESUMO

Antes do advento do posicionamento à satélites, os sistemas geodésicos eram baseados em modelos matemáticos que possuíam melhor adaptação em uma área específica da superfície terrestre, onde eram feitos os levantamentos geodésicos com propósitos de mapeamento. Nesta época a precisão métrica era considerada satisfatória. Com a adoção das técnicas espaciais de posicionamento por toda comunidade científica, os sistemas geodésicos assumiram um caráter global. Considerando a precisão centimétrica obtida por estes sistemas, o fator tempo tornou-se o principal elemento na sua manutenção. Como consequência das novas tecnologias, a mudança de um sistema local para um sistema geocêntrico produz grandes benefícios, principalmente quanto a compatibilidade das informações a nível internacional. Envolvido no Projeto Sistema Geocêntrico de Referência para a América do Sul – SIRGAS, o qual tem como propósito o estabelecimento de um sistema geodésico para toda a América do Sul, o Brasil dará o primeiro passo para a concretização desta mudança.

A integração da Rede Geodésica Brasileira no SIRGAS será desenvolvida através de um ajustamento simultâneo da rede, usando o software *Geodetic Adjustment using Helmert Blocking of Space and Terrestrial data* (GHOST). No ajustamento, será adotado o elipsóide GRS-80 e toda a rede Brasileira será injuncionada nas 11 estações SIRGAS em território nacional. Os Dados espaciais e terrestres serão combinados para gerar coordenadas de aproximadamente 5000 estações. Serão apresentados alguns estudos comparativos entre as quantidades obtidas nos modelos do geopotencial, informações estas utilizadas como correções às observações da rede clássica, bem como os resultados preliminares do ajustamento e um estudo para estimativa de parâmetros de transformação entre SAD69 e SIRGAS.

### ABSTRACT

Prior to the advent of satellite positioning, geodetic systems were based on a mathematic model of the Earth which best fits over a specific area. The surveys were developed for mapping requirements where precision of a meter was considered satisfactory. With the adaptation of space positioning techniques by the scientific community, the geodetic systems assumed a global character where centimetric precision could be obtained by these systems. As a consequence of the new technologies, the change from local datum to geocentric reference systems is required, in order to make the information compatible on an international level. To this end Brazil has been involved in the definition of the South American Geocentric Reference System (SIRGAS), whose purpose is to establish a geodetic system for the whole of South America. Brazil will complete the next step to accomplish this change.

The integration of Brazilian Geodetic Network to SIRGAS will be carried out through a simultaneous adjustment of the network using the software *Geodetic Adjustment using Helmert Blocking of Space and Terrestrial data* (GHOST). In the adjustment, the GRS80 ellipsoid will be adopted and all Brazilian Network will be constrained by 11 SIRGAS stations within the national area. Terrestrial and spatial data will be combined to generate coordinates for about 5000 stations. Some comparison studies about geoid model quantities to be adopted in the adjustment will be presented as well as some preliminary adjustment results.

#### 1. Introdução

Sendo responsável pela geodésia e a cartografia no Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e

Estatística (IBGE) começou o estabelecimento da rede geodésica Brasileira na década de 40. Desde então, os métodos de levantamento e de processamento passaram por grandes transformações, principalmente com respeito a sua precisão. O primeiro ajustamento global e simultâneo da rede Brasileira foi executado em 1996, sendo estimadas nessa época algumas distorções devidas ao estabelecimento do Datum Sul-Americano 1969 (SAD69)[IBGE,1996].

Atualmente com a extensa aplicação das técnicas de posicionamento espacial, foi necessário adotar um sistema geocêntrico de referência. Com este objetivo, o Brasil colaborou com sua ativa participação no projeto SIRGAS através do suporte técnico, sendo um dos centros de dados do projeto, nas aplicações das recomendações feitas pelo comitê, como por exemplo, a integração das redes geodésicas nacionais ao sistema SIRGAS[SIRGAS, 1997]. Outro fator importante a ser considerado, é que o sistema SIRGAS é a realização mais precisa do ITRF (International Terrestrial Reference Frame) na América do Sul.

Ao contrário de outros países da América do Sul que optaram pela implantação de uma nova rede geodésica baseada na técnica GPS, as dimensões continentais do Brasil, conduziram à alternativa de se utilizar todas as observações da rede clássica, combinadas às observações GPS.

Optou-se pelo estabelecimento de uma Rede de Controle GPS ativa, a qual recebeu a denominação de Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC[Fortes, 1997], atualmente contando com 10 estações, e a sua combinação com redes GPS em áreas de interesse econômico e político.

Para a integração da rede Brasileira ao Sistema SIRGAS, as 11 estações SIRGAS foram conectadas às estações geodésicas já existentes. Inicialmente foi efetuado um ajustamento de todas as campanhas GPS levantadas até o ano 1998, formando-se, assim, uma estrutura denominada Rede Nacional GPS.

A combinação da rede clássica com a rede Nacional GPS em um ajustamento simultâneo utilizando a técnica de *Helmert Blocking*, foi possível porque as observações clássicas já haviam passado por um processo de validação e armazenamento em meio magnético no último ajustamento, realizado em 1996, além de ambas redes terem em comum 56 estações.

O presente trabalho apresenta os dados do ajustamento e a metodologia usada na integração da rede geodésica Brasileira ao SIRGAS, bem como seus resultados preliminares. Com este propósito os itens 2 e 3 são dedicados à apresentação dos dados utilizados no ajustamento. No item 4 são apresentados resultados de

um estudo comparativo feito entre as ondulações geoidais obtidas através dos modelos OSU91A e EGM96 quando com valores obtidos por GPS e Doppler. A avaliação servirá para a adoção das informações (componentes do desvio da vertical e ondulação geoidal) de um dos modelos do geopotencial no ajustamento. Os resultados preliminares são apresentados no item 5 e no item 6 é proposta uma estimativa de parâmetros de transformação entre SAD69 e SIRGAS combinada à modelagem de distorções provenientes do processo de materialização da rede.

## **2. Dados Terrestres**

Todas as observações da rede clássica utilizadas no ajustamento global em SAD69 concluído em 1996[IBGE, 1996], foram adotadas para a integração ao SIRGAS. Considerando que os processos de validação e armazenamento das observações foram anteriormente desenvolvidos, as mesmas informações, bem como seus pesos, foram mantidos inalterados neste ajustamento.

## **3. Dados Espaciais**

No período 1973-1991, o IBGE fez uso do sistema de posicionamento geodésico por satélite TRANSIT, especialmente em áreas de difícil acesso, como por exemplo na região amazônica. O método observacional para a obtenção das coordenadas das estações foi o posicionamento isolado. A fim de se obter melhores resultados para as observações DOPPLER, estas foram pós-processadas com o programa GEODOP V adotando-se efemérides precisas[Godoy, 1991]. Para este ajustamento apenas 179 estações DOPPLER foram incluídas, as quais são coincidentes com estações clássicas.

A tecnologia GPS começou a ser usada no IBGE em 1991, sendo a primeira experiência a participação no projeto internacional GIG91. Hoje a Rede Nacional GPS é composta por campanhas realizadas até 1998, envolvendo um total de 669 estações. O processamento destes dados teve um tratamento diferenciado. Até 1994, um total de 187 estações GPS foram processadas com o software TRIMVEC Plus, versão D[Pereira, 1993] utilizando efemérides operacionais. Os dados GPS posteriores à 1994 passaram a ser processados com o software Bernese versão 4.0 utilizando efemérides precisas. Nos dois casos as coordenadas das estações e a sua respectiva matriz variância-covariância (MVC) foram geradas na solução final do processamento das campanhas GPS, informações estas a serem utilizadas como entrada no ajustamento global. As correlações matemáticas foram corretamente estimadas somente para campanhas processadas no software Bernese. Para elaboração do arquivo de entrada do ajuste, os dados de cada campanha individual foram transformados para o formato do software GHOST e foi efetuado um ajustamento fixando somente uma estação. A variância à

posteriori obtida foi usada para escalar as MVC das campanhas GPS. Em cada campanha este procedimento foi repetido e em uma segunda etapa os dados foram incluídos no ajustamento final. Para a integração SIRGAS participam um total de 1752 linhas de base GPS.

#### 4. Ondulações Geoidais e Componentes do Desvio da Vertical

A modelagem matemática do software de ajuste requer que cada estação da rede horizontal (clássica) tenha um valor associado de ondulação geoidal e componentes do desvio da vertical. Considerando que apenas 5% da rede clássica possui valores das componentes do desvio da vertical obtidos pelo método astro-geodésico e adicionado ao fato da última versão do modelo geoidal ser baseado no modelo do geopotencial GEMT2[Blitzkow, 1991], decidiu-se então gerar estas informações através de um modelo do geopotencial utilizado atualmente pela comunidade internacional. Atualmente os modelos mais utilizados são: OSU91A (Potential Coefficient Model OSU91A - Ohio State University) e EGM96 (Earth Gravitational Model – 1996).

Para o modelo OSU91A as informações foram calculadas no programa TSCHERN[Tcherning, 1983] e para o modelo EGM96 foi usado o programa F477[Rapp, 1991]. Nos dois casos as informações do geóide foram baseadas em um conjunto de coeficientes de harmônicos esféricos normalizados do geopotencial até o grau e ordem 360. Os valores obtidos nos modelos foram comparados às ondulações geoidais calculadas em 316 estações observadas por GPS e DOPPLER. A avaliação estatística é apresentada na Tabela 4.A. Apesar dos parâmetros estatísticos serem muito similares em ambos modelos, optou-se pelo modelo EGM96 por fornecer valores máximo e mínimo menores que no OSU91A.

TABELA 4.A – COMPARAÇÃO ENTRE ONDULAÇÕES GEOIDAI OBSERVADAS COM GPS/DOPPLER E MODELOS DO GEOPOTENCIAL OSU91A E EGM96.

Estatística	DOP/GPS X OSU91A	DOP/GPS X EGM96
Média	-0.100	0.260
Desvio Padrão	2.01	2.02
Mínimo	-6.26	-4.97
Máximo	5.24	4.96

#### 5. A Integração ao Sistema SIRGAS

O software GHOST foi escolhido para o ajustamento da rede geodésica Brasileira devido às suas principais características:

- (1) Método de *Helmert Blocking* [Beattie, 1987] para a divisão de grandes redes geodésicas, possibilitando o ajustamento simultâneo.
- (2) Modelo matemático tridimensional para altitudes fixas, permitindo a combinação de redes clássicas e GPS.

Além das considerações expostas acima, um fator de importância na escolha do software foi o seu desenvolvimento e adoção pelo Canadá no ajustamento do NAD83 – North American Datum 1983. O software GHOST foi instalado no IBGE em plataformas UNIX/HP e DOS.

O procedimento de divisão de blocos foi desenvolvido por um programa utilitário chamado BLOCK, que em função das coordenadas dos vértices de um polígono faz a divisão de um bloco pertencente a um nível superior ("parent") em dois, no nível inferior ("sibling"). Este programa também faz a identificação das estações de ligação entre blocos, chamadas *estações de junção*, através das quais a integridade das ligações entre os blocos é garantida. Neste caso é feita a opção para a solução parcial das equações normais, ou seja, as estações de junção têm seus parâmetros resolvidos a priori em um nível superior ("parent") para posterior solução dos parâmetros internos de cada bloco em um nível inferior ("sibling") [IBGE, 1996]. A definição da estratégia para a divisão em blocos foi baseada na escolha de um menor número possível de estações de ligação entre blocos, objetivando assim, minimizar o esforço computacional no ajustamento. A Figura 5.b, apresenta a rede geodésica dividida em 8 blocos. As observações utilizadas no ajustamento global são:

– n.º de Direções horizontais	:	16913
– n.º de Distâncias	:	1534
– n.º de Azimutes astronômicos	:	389
– n.º de Equações de Posição (Doppler)	:	179
– n.º de Equações de Diferença de Posição (linhas de base GPS)	:	1752
– n.º de Equações Normais Reduzidas Parciais	:	12

As incógnitas do ajustamento são as coordenadas das 5381 estações mais 15 parâmetros auxiliares, sendo eles:

- 1 orientação para os azimutes em FK5;
- 7 parâmetros de escala para as distâncias da rede clássica;
- 7 parâmetros de transformação entre o WGS84 e o ITRFyy (resultados GPS processados com efemérides operacionais e precisas).

Na Tabela 5.a pode ser visto que os parâmetros de translação e escala entre WGS-84 e ITRFyy são de expressão significativa, enquanto os parâmetros de rotação devido a sua pequena dimensão poderão ser desprezados, não havendo a necessidade de estimá-los.

TABELA 5.A: PARÂMETROS AUXILIARES ESTIMADOS NO AJUSTAMENTO GLOBAL.

Parâmetro	Valor	Desvio Padrão
FK5	2.2929"	0.16
TRAXWGS84	2.3629 m	0.18
TRAYWGS84	0.6458 m	0.19
TRAZWGS84	0.0556 m	0.11
ROTXWGS84	-0.0015"	0.01
ROTYWGS84	-0.0017"	0.01
ROTZWGS84	-0.0061"	0.01
WGS84SCPR	-0.0902 ppm	0.01
G66scale	-3.3023 ppm	0.40
BASscale	-1.4358 ppm	0.92
Posudes	8.9358 ppm	0.62

Pogoest	6.0735 ppm	0.74
Ponordes	5.2051 ppm	0.72
Ponorte	9.8976 ppm	0.72
Ponort	6.0735 ppm	0.73

Para finalizar, as 11 estações SIRGAS foram injuncionadas com os desvios padrão de suas respectivas coordenadas divididos pelo fator 10, ou seja dando um peso mais forte às coordenadas SIRGAS. A aplicação deste fator 10 deve-se ao fato de que na maioria das vezes os resultados processados com o software Bernese foram muitos otimistas, gerando, assim, desvios para as coordenadas da ordem do milímetro. Isso fazia com que as coordenadas das campanhas GPS tivessem um peso mais alto do que as estações SIRGAS, conduzindo a sensíveis alterações nas coordenadas das estações SIRGAS, o que seria indesejável. A convergência foi alcançada no ajustamento após a terceira iteração, obtendo-se uma variância *a posteriori* de 1.511.

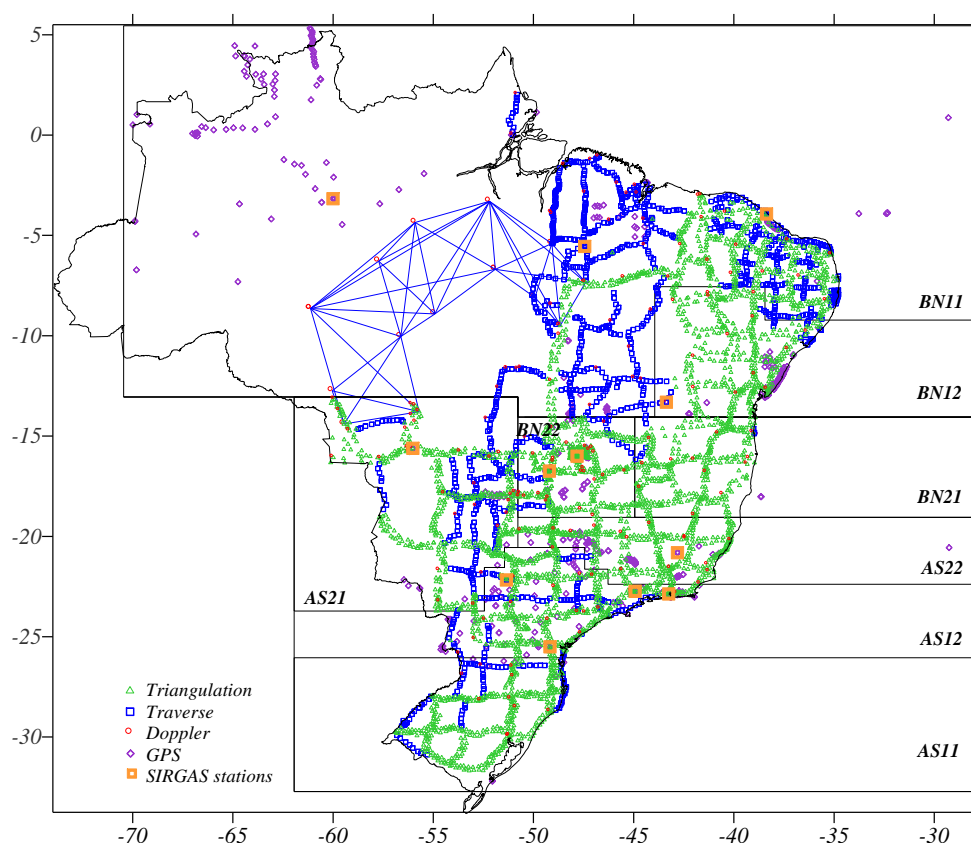


Figura 5.b - Rede Geodésica Brasileira e a divisão em blocos

Foram utilizados dois critérios para a análise da estimativa de precisão das coordenadas elipóidicas. O primeiro critério é baseado na precisão absoluta das coordenadas com relação ao sistema de referência, a entidade adotada para esta análise é o desvio padrão das coordenadas. Os gráficos 5.c e 5.d representam a

precisão absoluta das três componentes (latitude, longitude e altitude) nas redes GPS e clássica+GPS, respectivamente. Para todos os testes estatísticos foi aplicado o nível de confiança de 95%. No gráfico 5.c observa-se que, cerca de 50% das coordenadas (latitude, longitude e altitude) da rede GPS encontram-se com

erro absoluto de 1 a 10 cm. O gráfico 5.d apresenta resultados esperados numa rede clássica, analisando-se, neste caso, apenas as componentes horizontais (latitude e longitude), verificando-se que, cerca de 70% dos erros absolutos encontram-se entre 20 a 50 cm.

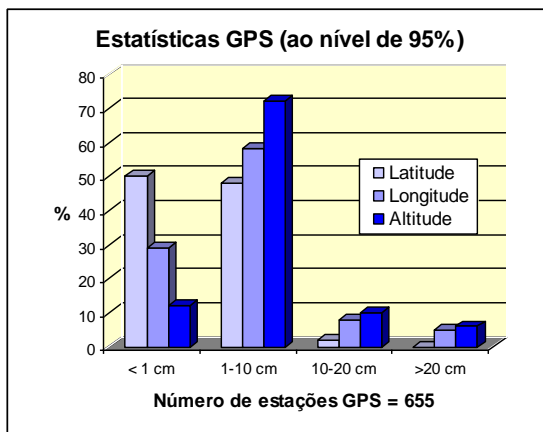


Gráfico 5.c - Distribuição estatística dos desvios padrão das coordenadas da Rede Nacional GPS.

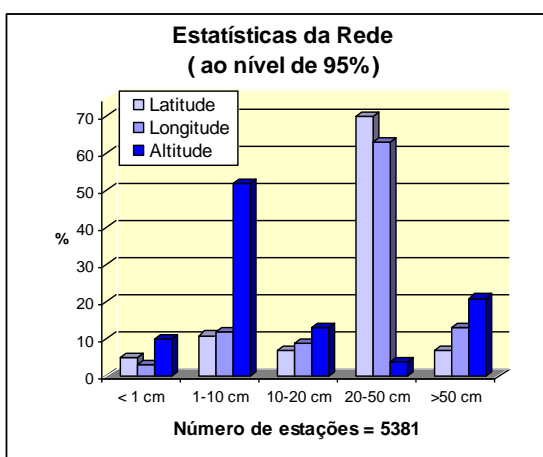


Gráfico 5.d - Distribuição estatística dos desvios padrão das coordenadas da rede clássica+GPS.

O segundo critério utilizado para análise de precisão da rede é baseado na precisão relativa das coordenadas. A entidade comumente utilizada para esta avaliação é a elipse relativa de erros, representada através do erro relativo obtido nas linhas de base, expresso em *partes por milhão* (ppm). Para este trabalho só foram analisados os erros relativos referentes às linhas efetivamente observadas, ao nível de confiança de 95%. No gráfico 5.e verifica-se que, avaliando 1219 linhas de base GPS, cerca de 60 % encontram-se com erros relativos entre 0 a 1 ppm, enquanto no gráfico 5.f, para 12364 linhas de base observadas em toda a rede geodésica encontram-se 60% dos erros relativos entre 10 a 20 ppm, fato este esperado para uma rede clássica.

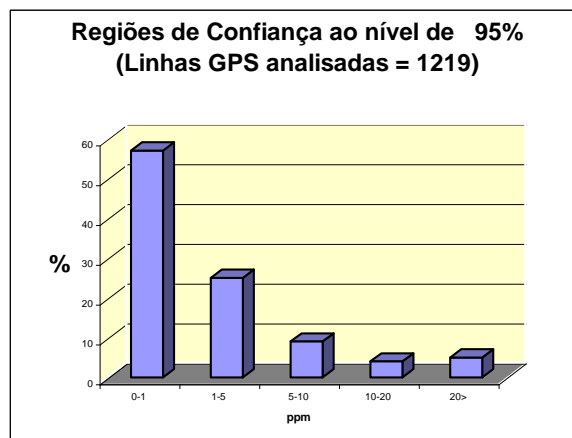


Gráfico 5.e - Distribuição estatística da precisão das linhas de base GPS ajustadas.

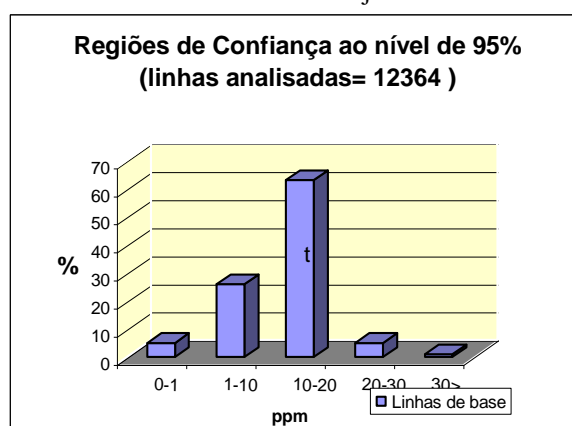


Gráfico 5.f - Distribuição estatística da precisão das linhas de base observadas em toda a rede geodésica.

## 6. Parâmetros de Transformação entre SAD-69 e SIRGAS

Estabelecido no final da década de 60, o SAD-69 é o sistema geodésico de referência oficialmente adotado pelo Brasil. Com o advento das técnicas de posicionamento por satélite, tornou-se necessário a determinação de parâmetros de transformação entre os vários sistemas de referência geocêntricos, como por exemplo, o NWL-10D, NSWC-9Z2 e WGS-84, procurando-se, desta forma, a compatibilidade deles com o SAD69. Em 1997 com os resultados do ajustamento da rede de referência SIRGAS, foi calculado um conjunto de parâmetros de transformação entre SAD69 e SIRGAS, utilizando-se apenas 4 estações (Curitiba, Cachoeira Paulista, Brasília, Presidente Prudente), obtendo-se os seguintes resultados:

- Translação em X : 67.327 +- 0.036 m
- Translação em Y : -3.899 +- 0.036 m
- Translação em Z : 38.292 +- 0.036 m

Com a conclusão do ajustamento global e simultâneo da rede geodésica no sistema SIRGAS, tem-se agora a possibilidade de estimar parâmetros de transformação entre SAD69 e SIRGAS e modelar as distorções provenientes das materializações de ambos sistemas.

A alternativa proposta neste trabalho para a estimativa das diferenças entre os sistemas é dividida em duas etapas:

1. Cálculo de parâmetros através da transformação de similaridade ou Helmert (preserva a ortogonalidade

nas coordenadas transformadas). Conforme a análise estatística das coordenadas ajustadas (vide item 5), observa-se que a rede Brasileira possui diversos níveis de precisão que variam de poucos centímetros a quase um metro. O programa DATUM foi utilizado para o cálculo dos parâmetros. Este programa possui um ponto desfavorável pois assume o mesmo peso para todas as estações. Para contornar este problema foram utilizadas estações com coordenadas de melhor precisão da rede. Os valores obtidos nos cálculos são apresentados na tabela 6.g.

**TABELA 6.G - VALORES DOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO SAD69 => SIRGAS**

SAD69 -> SIRGAS	Translação em X (m)	Translação em Y (m)	Translação em Z (m)	Rotação em X (")	Rotação em Y (")	Rotação em Z (")	Escala (ppm)
3 parâmetros	-67.358	3.974	-38.315	-	-	-	-
4 parâmetros	-67.148	3.748	-38.403	-	-	-	-0.0510
7 parâmetros	-67.040	3.806	-39.291	-0.0004	0.0060	-0.0027	-0.0510

2. Elaboração de um modelo polinomial de distorção, fornecendo uma representação contínua das diferenças entre os dois conjuntos de coordenadas. A princípio deve-se remover as diferenças entre os sistemas (etapa 1), para permitir que o polinômio modele somente a distorção proveniente de ambas materializações. Para elaboração do modelo de distorções serão utilizadas todas as estações existentes.

A Figura 6.h representa as diferenças entre as componentes horizontais dos sistemas SAD69 e SIRGAS (resultados da etapa 1) na forma de isolinhas. Para gerar este cartograma foram utilizadas somente as coordenadas SIRGAS, consideradas as de melhor

precisão na rede, ou seja, coordenadas isentas ( ou quase isentas) de distorções originadas da materialização dos sistemas, e a estação Chuá, ponto origem do sistema SAD69. Comprova-se, através desta figura, que o deslocamento horizontal aumenta para o sul do país, chegando a atingir 70 metros e uma variação de 15 metros no contexto nacional. Em contrapartida, na Figura 6.i podem ser vistas as distorções da rede brasileira (resultados da etapa 2), na forma vetorial, entre as materializações SAD69 – 1996 ( ajustamento simultâneo SAD69) e SIRGAS – 1998 (ajustamento simultâneo SIRGAS), estas diferenças chegam a atingir 2.40 metros e uma média de 0.6 metros.

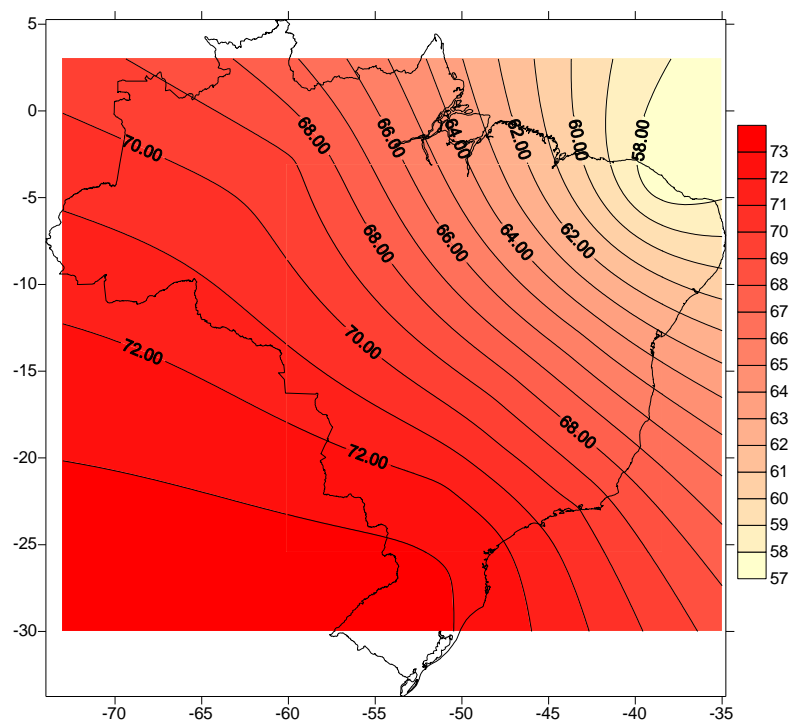


Figura 6.h - Isolinhas representando o deslocamento horizontal entre os dois sistemas SAD69

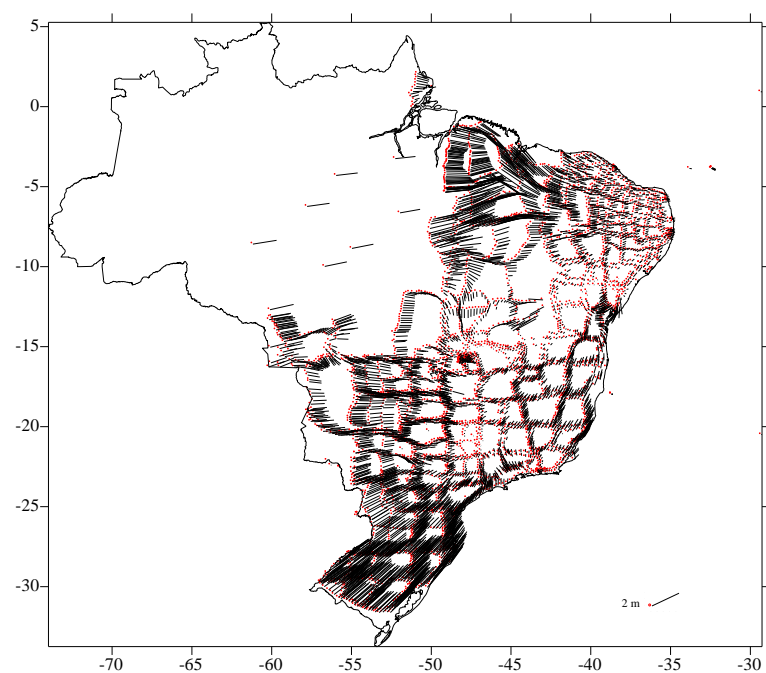


Figura 6.i - Vetores representando o deslocamento horizontal entre a materialização SAD69 - 1996 e SIRGAS - 1998.

## 7. Considerações finais

Alguns testes adicionais deverão ser efetuados antes da conclusão final do ajustamento, tais como:

- Avaliar a necessidade de uma análise da variação temporal da rede. Com este objetivo foi desenvolvido um programa que calcula a variação das coordenadas em diferentes épocas baseada no modelo global de movimento de placas NNR-NUVEL-1A.

- Estimativa de parâmetros de transformação mais confiáveis. Alguns estudos para a adoção do sistema SIRGAS para cartografia estão sendo feitos. A primeira etapa é estudar a melhor forma de estimar um conjunto de parâmetros de transformação mais adequados, de forma a automatizar a elaboração da cartografia referida ao SIRGAS. Sabe-se que estes processos são lentos devido ao fato de que grande parte do acervo cartográfico não se encontra em formato digital, mas esforços estão sendo

encaminhados para a mais rápida conclusão desta etapa.

## 8. **Bibliografia**

Beattie D.S., 1987, Program GHOST User Documentation, Geodetic Survey of Canada, Ottawa.

CADESS H. et al (1991), *Inter American Geodetic Integration*, PAIGH.

Fortes L.P.S., 1997, Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC), Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia.

Godoy, R.D. et al, 1991, Reprocessamento de estações DOPPLER, XV Congresso Brasileiro de Cartografia, São Paulo.

IBGE, 1996, Ajustamento da Rede Planimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro – Relatório, Rio de Janeiro, Brasil.

NGS, North American Datum of 1983 (1983), NOAA Professional Paper NOS2, National Geodetic Information Center, NOAA.

Rothacher M., Mervart L., 1996, Bernese GPS Software Version 4.0, Astronomical Institute University of Berne, Berne.

SIRGAS, 1997, Relatório Final, IBGE, Rio de Janeiro.

Blitzkow, D. et al; Mapa Geoidal do Brasil - 1992; IBGE/EPUSP-PTR, Rio de Janeiro, 1992.

NIMA (National Imagery and Mapping Agency), 1997, Technical Report, Department of Defense World Geodetic System 1984, NIMA TR 8350.2, Third Edition, 171p.

Pereira, K.D., 1993, Rede Nacional GPS, XVI Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro.

Rapp H.R., 1991, The Use of Potential Coefficient Models in Computing Geoid Undulations, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University.

Tcherning, C.C., Rapp, R.H., Goad, C., 1983, A Comparison of Methods for Computing Gravimetric quantities from High Degree Spherical Harmonic Expansions, Manuscripta Geodaetica, Vol.B, pp. 249-272.