

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/1 71-82
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

DETERMINAÇÃO DO MODELO DE DEFORMAÇÃO DA REDE GNSS/SP COM BASE NA TEORIA DA ELASTICIDADE

*Determination of a Mathematical Model of Deformation of GNSS/SP Network
Based on the Theory of Elasticity*

Franciane Lima Caldas¹ & João Carlos Chaves²

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT / Departamento de Cartografia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas - PPGCC, Brasil.
francianecaldas@hotmail.com

²Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT / Departamento de Cartografia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas - PPGCC, Brasil.
Subdivisões da Instituição
jcchaves@fct.unesp.br

Recebido em 30 de Abril, 2014/ Aceito em 30 de Agosto, 2014
Received on April 30, 2014/ Accepted on August 30, 2014

RESUMO

Este artigo demonstra um estudo relacionado à influência de forças externas na superfície terrestre, analisando dados registrados de determinadas estações da rede GNSS/SP e as deformações às quais elas são submetidas. Para a análise das deformações foi aplicado o Teste de Congruência Global nas estações da Rede GNSS/SP como também das estações de referência para estudo dos deslocamentos e estabilidade da rede. Após a verificação da estabilidade dos pontos de referência foram então calculados os parâmetros de deformação. Dessa maneira, utilizou-se uma série temporal com os dados dos anos de 2010, 2011 e 2012 coletados para 10 estações de monitoramento contínuo GNSS (seis estações da estrutura investigada e quatro estações utilizadas como referência) utilizando os softwares GAMIT (GPS Analysis at MIT) e GLOBK (Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program). Os resultados indicam que ocorreram deslocamentos na estrutura investigada durante o período analisado e que as estações utilizadas no processamento e no cálculo das deformações como referência permaneceram estáveis. Com base nos resultados obtidos, foi determinado um modelo matemático que permite a estimativa da deformação para os pontos da Rede GNSS/SP.

Palavras chaves: Rede GNSS/SP, Deformação, Teste de Congruência Global, Redes Geodésicas, Geodinâmica.

ABSTRACT

This article demonstrate a study related to the influence of external forces on the earth's surface in which were analyzed data from certain stations of GNSS/SP network and the deformations that are subject. For the analysis of the deformation was applied the Global congruence test on GNSS / SP Network stations and reference stations to study displacement and the network stability. After checking the stability of reference points were then calculated the parameters of deformation. Thus , was used a time series with data of the years 2010 , 2011 and 2012 listed for 10 continuous monitoring GNSS stations (six stations of the structure investigated and four stations used as reference) using the GAMIT software

(GPS Analysis at MIT) and GLOBK (Global GPS Kalman filter VLBI and Analysis Program). The results indicate that there were displacement in the structure investigated throughout the period analyzed and the stations that were used in processing to calculate the reference strain remained stable. Based on these results, a mathematical model was determined to allow the estimation of deformation for points of the GNSSSP Network.

Keywords: GNSS Network SP, Deformation, Global Congruency Test, Geodetic Networks, Geodynamics.

1. INTRODUÇÃO

A teoria da tectônica das placas prevê que as principais deformações da superfície da Terra são as que ocorrem ao longo dos limites das grandes placas litosféricas (interplacas), que podem ser convergentes, divergentes ou transformantes. No entanto, na região interior dessas placas também ocorrem deformações (intraplacas).

De acordo com Biessy *et al.* (2011), a superfície da Terra manifesta-se por processos de deformações que são estudados por métodos geodésicos. Essas deformações são provenientes de processos geológicos que agem a partir de alguns segundos a milhões de anos e em áreas que variam de metros a centenas de quilômetros. São estudados principalmente nos limites das placas, onde a tensão é muito intensa e onde os eventos como terremotos podem ter importantes impactos sociais e econômicos.

Porém, estudos que tratam da ocorrência de eventos sísmicos no interior das placas litosféricas, mostram que as tensões se acumulam nas falhas geológicas. Apesar de pouco frequente, esses eventos referem-se a uma desconhecida deformação, o que representa dificuldades significativas para compreender os riscos associados (CALAIS *et al.*, 2006).

Diversos processos podem contribuir com a ocorrência de deformação no interior das placas tectônicas, entre eles a exploração de águas de aquíferos naturais (BIESSY *et al.*, 2011). É crescente a preocupação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), principalmente no que diz respeito à proteção e uso sustentável da água. No entanto, atribuem um papel pouco expressivo sobre o monitoramento da superfície acima dos aquíferos, sujeita a subsidência devido à extração de água. Em alguns casos, a extração de água subterrânea através de poços pode provocar

subsidência de terrenos nas imediações, levando a rachaduras em construções e afundamento do terreno (CABRAL *et al.*, 2006).

Outro fator que também pode contribuir para a subsidência da superfície da Terra é o acúmulo de grande carga hidrológica dos reservatórios das barragens de Usinas Hidrelétricas (UHE). A formação de grandes reservatórios de (UHE) pode induzir a deformação na crosta terrestre, e ocasionar sismos em regiões antes assísmicas. Este fenômeno é conhecido como Sismicidade Induzida por Reservatórios (GUPTA e RASTOGI, 1976; apud TEIXEIRA, 2005).

Neste contexto, o objetivo desse trabalho é encontrar o modelo de deformação para a estrutura geodésica estabelecida pelos pontos da Rede GNSS/SP. Para tanto, são utilizadas pontos que materializam a rede, necessitando assim, verificar a estabilidade dos pontos de referência aplicando-se o Teste de Congruência Global (TCG).

2. REDE GNSS SP E AQUISIÇÃO DOS DADOS

A área de estudo compreende as estações pertencentes à Rede GNSS/SP: Rosana (ROSA), Ilha Solteira (ILHA), Presidente Prudente (PPTE), Araçatuba (SPAR), São José do Rio Preto (SJRP) e Ourinhos (OURI), na região centro-oeste de São Paulo.

Para servir de referência no processamento e ajustamento da rede monitorada foram escolhidas estações pertencentes à Rede IGS - *International GNSS Service* - em território brasileiro. As estações foram selecionadas com base no relatório No. 86 do DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*) sendo estas algumas das estações adotadas na última realização do SIRGAS: BRAZ, CHPI, UFPR e SAVO. A localização da Rede GNSS/SP pode ser vista na figura 1 a seguir.

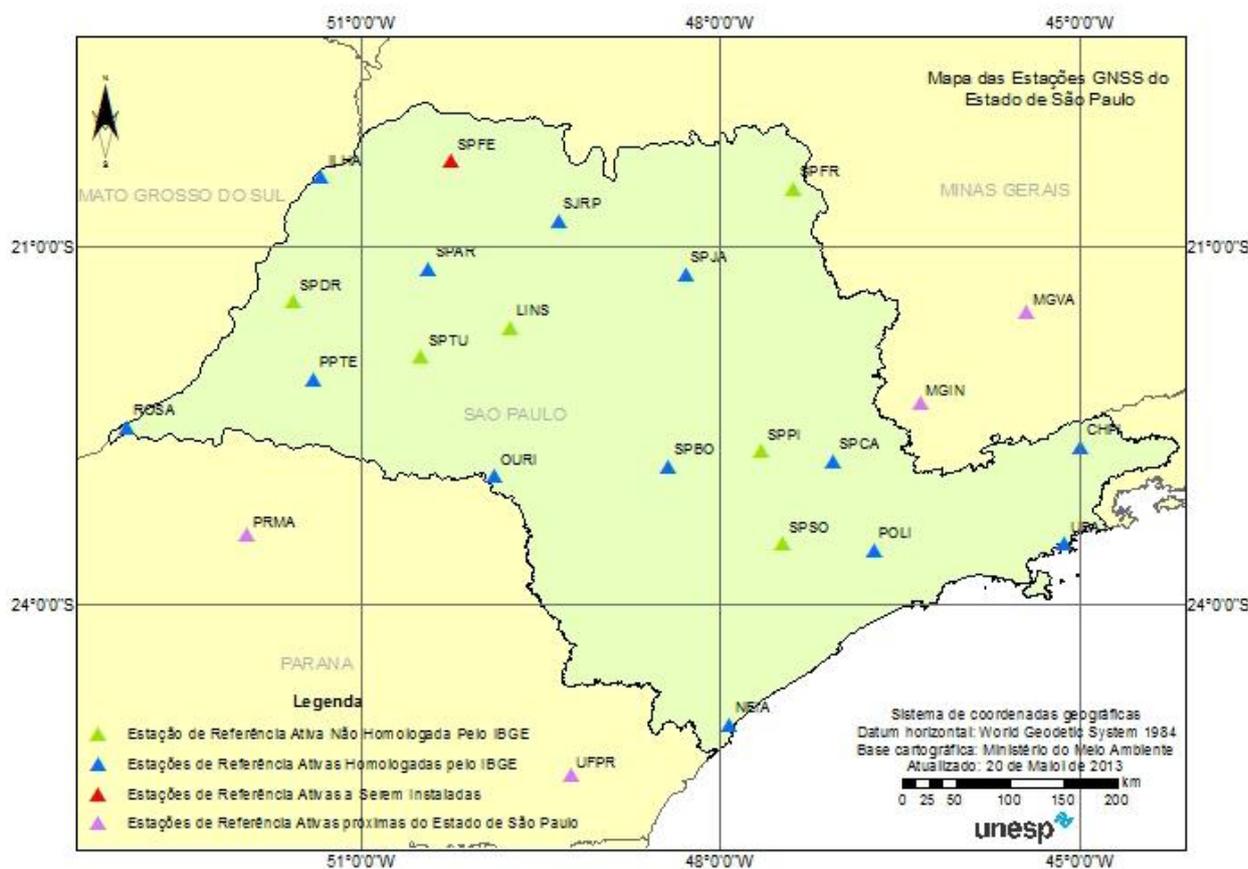


Fig. 1 - Rede GNSS São Paulo. Fonte: disponível em: <http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/rede-gnss-sp2089/>, acessado em 20/01/2013.

Para o processamento dos dados GNSS, utiliza-se o software GAMIT (*GPS Analysis at MIT*), desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), no Departamento da Terra, Atmosfera e Ciências Planetárias, no modo relativo, no servidor instalado na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT). Para o ajustamento e definição do referencial das estações utiliza-se o software GLOBK (*Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program*), também desenvolvido pelo MIT e acessado de forma remota, via servidor com SSH (*Secure Shell for Workstation*).

Nesta pesquisa, foram utilizados dados GNSS de três anos (2010, 2011 e 2012), período escolhido de acordo com o estudo realizado por Biessy (2011), suficiente para detectar deslocamentos.

Os dados de observação das estações para cada dia do ano foram adquiridos diretamente do site do IBGE (*Instituto Brasileiro de Geografia*

e Estatística), em que estes se encontram armazenados (<ftp://geoftp.ibge.gov.br/>). Estes dados estão compactados em formato RINEX (*The Receiver Independent EXchange*). As efemérides precisas são obtidas dos arquivos de dados do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) (<ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/product/>) e as efemérides transmitidas adotadas são as geradas pelo *Crustal Dynamics Data Information System* (CDDIS) (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/>).

A estratégia de processamento é a mesma adotada pelos Centros de processamento do SIRGAS, disponível em sua página (Guia: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Guias/2013_08_Guidelines_for_SIRGAS_Analysis_Centers_V2_1.pdf), como p.ex.: taxa de amostragem, máscara de elevação, órbitas/EOP, estratégia de base, peso das observações, modelo troposférico a priori, atraso zenital, ambiguidades, modelo carga oceânica, variação do centro de fase, coordenadas e velocidades, solução diária e solução semanal.

3. PARÂMETROS BÁSICOS DE DEFORMAÇÃO E TESTE DE CONGRUÊNCIA GLOBAL

A identificação do modelo de deformação é relevante para estudos relacionados ao monitoramento de estruturas, isto é, essencial para a prevenção e mitigação de acidentes naturais ou artificiais. É necessário confirmar a ocorrência de deslocamentos, para isso recorre-se a aplicação do teste de congruência global, verificando a estabilidade da estrutura.

3.1 Determinação do modelo de deformação

O modelo matemático pode ser estimado em função de um polinômio, de maneira que seus coeficientes representem os parâmetros de deformação da estrutura investigada, nesta pesquisa, a Rede GNSS/SP na região oeste do Estado de São Paulo, conforme Kuang (1996):

$$d(x,y,z,t - t_0) = B(x,y,z, t - t_0)c \quad (1)$$

onde: d é o vetor de deslocamento do ponto de coordenadas (x,y,z) , t_0 representa a época inicial e t representa a época final e c corresponde ao vetor de parâmetros de deformação desconhecidos.

Na forma vetorial:

$$d(x, y, z; t - t_0) = \begin{pmatrix} u(x, y, z; t - t_0) \\ v(x, y, z; t - t_0) \\ w(x, y, z; t - t_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_u(x, y, z; t - t_0)c_u \\ B_v(x, y, z; t - t_0)c_v \\ B_w(x, y, z; t - t_0)c_w \end{pmatrix} \quad (2)$$

Para o caso bidimensional, o deslocamento das componentes 'u' e 'v' nas direções X e Y, respectivamente, podem ser estimados por um polinômio de primeira ordem do tipo (SANTOS, 1999):

$$u = u(x,y) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) \quad (3)$$

$$v = v(x,y) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) \quad (4)$$

Associando as coordenadas cartesianas (x,y,z) , ao sistema geodésico local (e, n, u) teremos o seguinte modelo de deformação:

$$d_e = a_0 + a_1e_i + a_2n_i \quad (5)$$

$$d_n = b_0 + b_1e_i + b_2n_i \quad (6)$$

Estas equações relacionam os deslocamentos com as deformações e são denominadas de relações deslocamento - deformação.

3.2 Estimativa dos parâmetros de deformação

Para estimar os parâmetros de deformação em função dos deslocamentos, deve-se atender a duas hipóteses, segundo (SANTOS, 1999): admitir que o processo de deformação sofrido pela estrutura geodésica possa ser tratado de acordo com as teorias de deformação homogênea e infinitesimal; a ordem de grandeza dos deslocamentos relativos de dois vértices vizinhos é pequena, em comparação com a distância que os separa.

O problema ora colocado consiste na determinação das componentes do tensor de deformação, a partir da relação existente entre elas e os deslocamentos. Nesta relação, os parâmetros da deformação são expressos como derivadas parciais de primeira ordem da função deslocamento (SANTOS, 1999). Os parâmetros de deformação da rede geodésica GNSS/SP são estimados com base nos deslocamentos minimizados, ou seja, aplicando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), onde esta minimização é expressa por equações normais. Portanto, de forma similar ao que tem na Teoria da Elasticidade, ao analisar o comportamento de estruturas em função de equações diferenciais parciais, as quais têm a mesma informação das equações normais. Considera-se que a rede geodésica seja homogênea e isotrópica, ou seja, uma rede cuja alteração numa dada direção se mantém em todos os pontos.

Então, para a determinação das componentes do vetor deformação é necessário que a função deslocamento seja remodelada. Seja a função deslocamento definida como uma função vetorial por:

O vetor de deslocamentos (u) constitui-se pelas componentes de deslocamento do ponto (u_i, v_i) :

$$u = u(x, y) \quad (7)$$

$$v = v(x, y) \quad (8)$$

$$w = w(x, y) \quad (9)$$

Estas funções podem ser desenvolvidas em um polinômio de primeira ordem do tipo:

$$u(x, y) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) \quad (10)$$

$$v(x, y) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) \quad (11)$$

$$w(x, y) = c_0 + c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) \quad (12)$$

Onde: (x_0, y_0) representam as coordenadas do vértice analisado; (x, y) as coordenadas do vértice vizinho; as diferenças $(x - x_0)$ e $(y - y_0)$ indicam que o vértice analisado se constitui na origem de um sistema local de coordenadas; os coeficientes $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ são considerados como aproximações das derivadas parciais da função deslocamento; a_0, b_0 e c_0 são as translações.

Ainda conforme Santos (1999) para o cálculo dos parâmetros de deformação (incógnitas do mesmo problema), pode-se fazer uso das equações 56, para a vizinhança de cada vértice a ser analisado. Considerando como n o número de vértices integrantes da vizinhança do ponto analisado, neste caso, n é considerado o número de pontos estáveis, tem-se um conjunto de $3n$ equações a 9 incógnitas. Quando o número de pontos vizinhos for maior do que 3, pode-se partir para um processo de ajustamento usando-se, p.ex., o critério dos mínimos quadrados (GEMAEL, 1994).

$$\left\{ \begin{array}{l} u(x_1, y_1) = a_0 + a_1(x_1 - x_0) + a_2(y_1 - y_0) \\ v(x_1, y_1) = b_0 + b_1(x_1 - x_0) + b_2(y_1 - y_0) \\ w(x_1, y_1) = c_0 + c_1(x_1 - x_0) + c_2(y_1 - y_0) \\ \vdots \\ u(x_n, y_n) = a_0 + a_1(x_n - x_0) + a_2(y_n - y_0) \\ v(x_n, y_n) = b_0 + b_1(x_n - x_0) + b_2(y_n - y_0) \\ w(x_n, y_n) = c_0 + c_1(x_n - x_0) + c_2(y_n - y_0) \end{array} \right. \quad (13)$$

Estas equações podem ser reescritas na forma matricial como:

$$d + v = B\hat{c} \quad (14)$$

A determinação dos parâmetros de deformação (\hat{c}) é obtida, segundo Chrzanowski *et al.* (1986), por:

$$\hat{c} = (B^T P_d B)^{-1} B^T P_d d \quad (15)$$

onde: d representa o vetor deslocamento; P a matriz peso; B a matriz das derivadas parciais dos polinômios com relação às posições dos pontos.

3.3 Teste de congruência global

Para avaliar a detecção dos deslocamentos, as observações de uma mesma época e a solução final de cada época devem ser obtidas de forma independente, traduzindo em soluções não correlacionadas.

O teste de congruência global detecta estatisticamente se existem diferenças significativas de coordenadas em duas épocas, o deslocamento (d). O objetivo desse teste é verificar se um conjunto de pontos, comuns em ambas as épocas, permaneceu estável ou não, ou seja, se as soluções são congruentes.

A verificação dos deslocamentos é obtida pela diferença de coordenadas dos pontos, que materializam o sistema de referência na área da rede, entre épocas distintas. Devem se testar hipóteses para confirmar a suposição de que tais pontos não sofreram movimentação em relação à rede.

As hipóteses nula e alternativa para o respectivo teste são (HALIM *et al.*, 2001; FAZAN, 2010):

$$H_0: E\{d\} = 0 \quad (16)$$

$$H_a: E\{d\} \neq 0 \quad (17)$$

Sendo $d = X_j - X_i$ e a sua MVC (Σd) é obtida por:

$$\Sigma d = \Sigma X_j + \Sigma X_i \quad (18)$$

Sendo: ΣX_i e ΣX_j a MVC das coordenadas para as épocas i e j , respectivamente representadas por:

$$\Sigma X_i = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\Sigma X_j = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

O número de graus de liberdade e a variância a posteriori entre as épocas são calculados por:

$$r_{ij} = r_i + r_j \quad (21)$$

$$\sigma_{o_{ij}}^2 = \frac{(r_i \sigma_i^2 + r_j \sigma_j^2)}{(r_i + r_j)} \quad (22)$$

onde: r_i representa os graus de liberdade da primeira época; r_j representa os graus de liberdade da segunda época; r_{ij} o número de graus de liberdade entre as épocas i e j e $\sigma_{o_{ij}}^2$ a variância a posterior entre as épocas i e j .

Na aplicação do respectivo teste, calcula-se o valor da razão das variâncias entre as duas épocas (CASPARY, 2000; FAZAN, 2010):

$$F_c = \omega / \sigma_{o_{ij}}^2 \quad (23)$$

Sendo:

$$\omega = \frac{d^T \Sigma d^{-1} d}{h} \quad (24)$$

onde h representa a característica (rank) de Σd .

A hipótese nula é aceita a um nível de significância (α) caso:

$$F_c \leq F_{\alpha, h, r} \quad (25)$$

A rejeição da hipótese nula indica a ocorrência de deslocamento entre as duas épocas. O teste de congruência global é uma ferramenta importante para a determinação de tendências dos pontos que formam a rede de referência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados do processamento, ajustamento, teste de congruência e estimativa dos parâmetros de deformação da Rede Geodésica GNSS/SP.

4.1 Soluções geodésicas para o experimento

O processamento com o GAMIT forneceu como resultado as coordenadas e suas respectivas MVC, das estações, para cada campanha realizada. Nas tabelas de 1 a 6 são apresentados os desvios padrão das estações, para cada campanha.

Tabela 1: Desvio padrão (m) estimadas para estação de SJRP.

Campanha	σ_N	σ_E	σ_U
1ª campanha	0,00081	0,00058	0,00062
2ª campanha	0,00124	0,00103	0,00256
3ª campanha	0,00136	0,00129	0,00557
4ª campanha	0,00184	0,00387	0,00199
5ª campanha	0,00423	0,00334	0,00389
6ª campanha	0,00083	0,00067	0,00268
7ª campanha	0,00114	0,00103	0,00443

Tabela 2: Desvio padrão (m) estimadas para estação de SPAR.

Campanha	σ_N	σ_E	σ_U
1ª campanha	0,00090	0,00047	0,00211
2ª campanha	0,00138	0,00112	0,00369
3ª campanha	0,00152	0,00045	0,00401
4ª campanha	0,00136	0,00105	0,00483
5ª campanha	0,00111	0,00073	0,00311
6ª campanha	0,00090	0,00112	0,00214
7ª campanha	0,00166	0,00153	0,00623

Tabela 3: Desvio padrão (m) estimadas para estação de ROSA.

Campanha	σ_N	σ_E	σ_U
1ª campanha	0,00140	0,00067	0,00307
2ª campanha	0,00194	0,00136	0,00458
3ª campanha	0,00238	0,00170	0,00565
4ª campanha	0,00208	0,00145	0,00678
5ª campanha	0,00169	0,00109	0,00457
6ª campanha	0,00167	0,00120	0,00406
7ª campanha	0,00168	0,00107	0,00437

Tabela 4: Desvio padrão (m) estimadas para estação de ILHA.

Campanha	σ_N	σ_E	σ_U
1ª campanha	0,00113	0,00062	0,00278
2ª campanha	0,00147	0,00109	0,00383
3ª campanha	0,00124	0,00074	0,00339
4ª campanha	0,00165	0,00135	0,00601
5ª campanha	0,00136	0,00094	0,00404
6ª campanha	0,00178	0,00133	0,00489
7ª campanha	0,00125	0,00081	0,00350

Tabela 5: Desvio padrão (m) estimadas para estação de OURI.

Campanha	σ_N	σ_E	σ_U
1ª campanha	0,00085	0,00069	0,00234
2ª campanha	0,00107	0,00089	0,00320
3ª campanha	0,00094	0,00080	0,00279
4ª campanha	0,00223	0,00235	0,00971
5ª campanha	0,00106	0,00093	0,00342
6ª campanha	0,00147	0,00136	0,00389
7ª campanha	0,00129	0,00129	0,00462

Tabela 6: Desvio padrão (m) estimadas para estação de PPTE.

Campanha	σ_N	σ_E	σ_U
1ª campanha	0,00114	0,00065	0,00275
2ª campanha	0,00187	0,00140	0,00465
3ª campanha	0,00119	0,00072	0,00300
4ª campanha	0,00165	0,00124	0,00564
5ª campanha	0,00132	0,00090	0,00375
6ª campanha	0,00117	0,00066	0,00283
7ª campanha	0,00135	0,00095	0,00380

Analisando os desvios padrão das coordenadas ajustadas pode-se dizer que as observações que contribuíram com o ajustamento apresentaram diferença para as coordenadas ajustadas, menor que 0,00423 m para a componente Norte (N), para a componente Este (E) 0,00387 m e 0,00971 para a componente Up (U).

Também ao analisar as precisões das campanhas, constata-se que a primeira campanha apresenta valores melhores que as demais em todas as estações analisadas. Verificou-se que os valores obtidos são precisos e compatíveis com os resultados determinados por outros centros de processamento, apresentando discrepâncias da ordem de centímetros.

4.2 Cálculo dos deslocamentos das coordenadas das investigadas

A primeira análise foi o a determinação da resultante dos deslocamentos das coordenadas geodésicas locais (N, E, U). Para tanto se comparou os dados da 1ª campanha com os da 7ª campanha. Os deslocamentos foram utilizados como dados nos cálculos do TCG. Na tabela 7 apresenta os valores obtidos da resultante dos deslocamentos.

Tabela 7: Resultante dos deslocamentos (m).

Estações	Δd
OURI	0.0372
PPTE	0.0365
ROSA	0.0268
SJRP	0.0377
SPAR	0.0341
ILHA	0.0433

A figura 2 apresenta um gráfico com a resultante dos deslocamentos apresentadas na tabela 7.

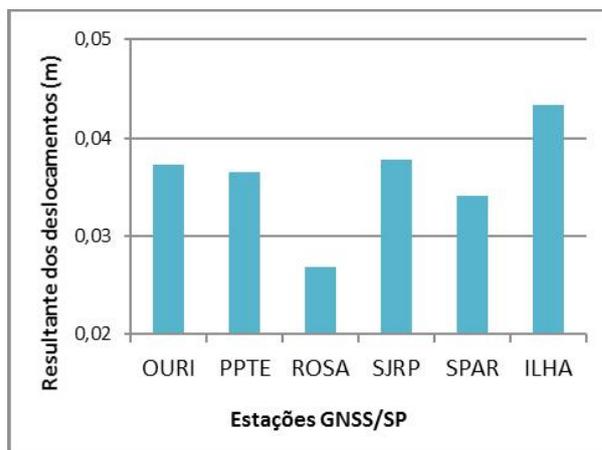


Fig. 2 - Gráfico da resultante do deslocamento das estações.

Os valores das coordenadas geodésicas foram plotados na figura 3 e foi possível perceber a direção dos deslocamentos das estações.

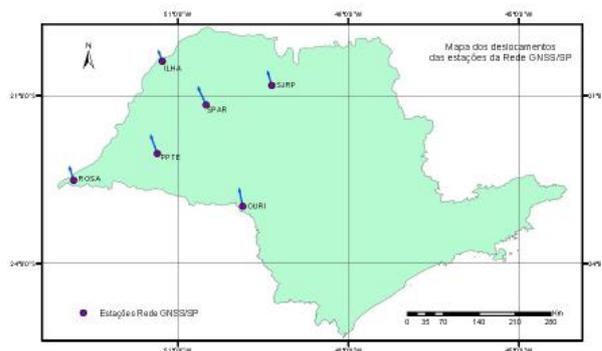


Fig. 3 - Vetor dos deslocamentos das estações.

De modo geral, os resultados apresentados na figura 3, apontam, para uma análise visual, que as estações tiveram um deslocamento na direção noroeste. Possivelmente, isso é fruto do movimento da placa, já que é a mesma direção com que a placa Sul Americana se movimenta.

4.3 Análise de congruência das estações pesquisadas

A aplicação do teste nas estações de referências e nas estações da Rede GNSS/SP foi feita por meio de combinação das épocas do ajustamento de duas a duas.

Foi aplicado o TCG 3D, utilizando as coordenadas (geodésica local) E , N e U e suas respectivas matrizes variância-covariância, resultante do ajustamento do processamento.

Para esse trabalho adotou-se 3 níveis de significância para aplicar os testes. Em cada nível de significância foi comparado o valor crítico de $F_{\alpha,h,r}$ e comparado com o calculado F_c . Consideraram-se os seguintes níveis de significância $\alpha = 0,1$ (10%), $\alpha = 0,05$ (5%) e $\alpha = 0,01$ (1%), com graus de liberdade correspondentes a cada ajustamento. O teste será aceito na situação onde $F_c < F_{\alpha,h,r}$. Lembrando que a rejeição e aceitação de H_0 indicam respectivamente, possível movimento e falta do mesmo.

As tabelas 8 a 13 apresentam as combinações das épocas para as estações analisadas comparando com os valores da estatística F_c contra o valor tabelado da distribuição F a um dado nível de significância α .

Tabela 8: Resultado do deslocamento entre as campanhas 1ª e 2ª.

Estação $F_{\alpha,h,r}$	F_c -	$\alpha = 0,1$ 2,08	$\alpha = 0,05$ 2,60	$\alpha = 0,01$ 3,78
BRAZ	1,78208	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	1,93138	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,03464	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	1,40273	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	0,91873	Aceito	Aceito	Aceito
SPAR	0,50718	Aceito	Aceito	Aceito
ROSA	1,32181	Aceito	Aceito	Aceito
ILHA	1,58095	Aceito	Aceito	Aceito
OURI	1,70482	Aceito	Aceito	Aceito
PPTE	2,17693	Rejeitado	Aceito	Aceito

A aplicação do TCG indicou deslocamento, ou seja, movimentação nas estações que foram rejeitadas no teste. Na comparação entre a 1ª e 2ª campanha a estação de PPT apresentou movimentação ao nível de significância $\alpha = 0,1$, sendo que foi aceita nos outros níveis de significância. As demais estações permaneceram estáveis.

Tabela 9: Resultado do deslocamento entre as campanhas 1ª e 3ª.

Estação $F_{\alpha,h,r}$	F_c -	$\alpha = 0,1$ 2,08	$\alpha = 0,05$ 2,60	$\alpha = 0,01$ 3,78
BRAZ	0,64638	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	1,55973	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,01089	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	0,93356	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	0,74202	Aceito	Aceito	Aceito
SPAR	1,45653	Aceito	Aceito	Aceito
ROSA	2,74995	Rejeitado	Rejeitado	Aceito
ILHA	2,58095	Rejeitado	Aceito	Aceito
OURI	1,53407	Aceito	Aceito	Aceito
PPTE	2,69440	Rejeitado	Rejeitado	Aceito

Aplicando o teste entre a 1ª e 3ª campanha as estações de ROSA e PPTE apresentaram movimentação aos níveis de significância de $\alpha = 0,1$ e $\alpha = 0,05$. Já a estação de ILHA apresentou movimentação ao nível de significância de $\alpha = 0,1$. As demais estações apresentaram ausência de movimentação.

Tabela 10: Resultado do deslocamento entre as campanhas 1ª e 4ª.

Estação $F_{\alpha,h,r}$	F_c -	$\alpha = 0,1$ 2,08	$\alpha = 0,05$ 2,60	$\alpha = 0,01$ 3,78
BRAZ	1,07024	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	0,90246	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,07935	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	1,78848	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	8,38152	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
SPAR	1,77939	Aceito	Aceito	Aceito
ROSA	3,57114	Rejeitado	Rejeitado	Aceito
ILHA	2,70218	Rejeitado	Rejeitado	Aceito
OURI	1,26652	Aceito	Aceito	Aceito
PPTE	2,71519	Rejeitado	Rejeitado	Aceito

Entre as campanhas 1ª e 4ª a análise apresentou indicações de deslocamento para as estações de ROSA, ILHA e PPTE aos níveis de significância de $\alpha = 0,1$ e $\alpha = 0,05$. Já a estação de SJRP apresentou movimentação em todos os níveis de significância analisados. As demais estações apresentaram ausência de movimentação.

Tabela 11: Resultado do deslocamento entre as campanhas 1ª e 5ª.

Estação $F_{a,h,r}$	F_c -	$\alpha = 0,1$ 2,08	$\alpha = 0,05$ 2,60	$\alpha = 0,01$ 3,78
BRAZ	1,02650	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	1,52764	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,09961	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	1,88718	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	5,34445	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
SPAR	2,50183	Rejeitado	Aceito	Aceito
ROSA	11,20488	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
ILHA	6,065677	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
OURI	8,97233	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
PPTE	4,29034	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado

Analisando as campanhas 1ª e 5ª as estações de SJRP, ROSA, ILHA, OURI e PPTE apresentaram movimentação em todos os níveis de significância analisados. Já a estação SPAR, que permaneceu estável nas campanhas 2ª, 3ª e 4ª, apresentou nessa campanha deslocamento ao nível de significância de $\alpha = 0,1$. As demais estações que pertencem à rede de referência apresentaram ausência de movimentação

Tabela 12: Resultado do deslocamento entre as campanhas 1ª e 6ª.

Estação $F_{a,h,r}$	F_c -	$\alpha = 0,1$ 2,08	$\alpha = 0,05$ 2,60	$\alpha = 0,01$ 3,78
BRAZ	1,15019	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	0,79671	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,56409	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	2,04775	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	15,4532	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
SPAR	5,32737	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
ROSA	5,40547	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
ILHA	8,77973	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
OURI	7,37765	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
PPTE	9,20279	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado

Entre as campanhas 1ª e 6ª a análise apresentou indicações de deslocamento para as estações de SJRP, SPAR, ROSA, ILHA, OURI e PPTE em todos os níveis de significância. As demais estações que pertencem à rede de referência apresentaram ausência de movimentação.

Tabela 13: Resultado do deslocamento entre as campanhas 1ª e 7ª.

Estação $F_{a,h,r}$	F_c -	$\alpha = 0,1$ 2,08	$\alpha = 0,05$ 2,60	$\alpha = 0,01$ 3,78
BRAZ	1,562497	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	2,26267	Rejeitado	Aceito	Aceito
SAVO	0,04074	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	1,10607	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	37,31060	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
SPAR	5,06212	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
ROSA	38,26468	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
ILHA	8,28725	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
OURI	5,22468	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado
PPTE	8,72534	Rejeitado	Rejeitado	Rejeitado

Finalmente entre a 1ª e 7ª campanha as estações da Rede GNSS/SP apresentaram deslocamento em todos os níveis de significância. Já para as estações utilizadas como referência no processamento e cálculo de deformação, somente a estação de CHPI apresentou movimentação ao nível de significância $\alpha = 0,1$. Já as outras estações da rede de referência permaneceram estáveis ao longo de todas as campanhas analisadas.

4.4 Estimativas dos parâmetros e do modelo de deformação

Utilizando as coordenadas geodésicas locais num sistema bidimensional, e aplicando a teoria descrita nos itens 3.1 e 3.2, obteve-se os coeficiente de deformação (em suas componentes u e v). Esses valores podem ser vistos na tabela 14.

Tabela 14: Parâmetros de deformação.

Estação	$a_1 (10^{-8})$	$a_2 (10^{-8})$	$b_1 (10^{-8})$	$b_2 (10^{-8})$
SJRP	2,553	- 6,396	- 10,00	20,00
SPAR	3,073	- 4,316	- 6,779	9,522
ROSA	2,985	- 4,193	- 6,914	9,712
ILHA	2,995	- 4,165	- 7,740	10,00
OURI	1,111	- 1,560	- 6,178	8,678
PPTE	2,985	- 4,193	- 6,914	9,712

Observa-se na tabela 14 que os valores dos parâmetros de deformação foram pequenos. Para os parâmetros lineares (a_1 e b_2) angulares (a_2 e b_1).

O modelo matemático de deformação para as estações da Rede GNSS/SP é expresso por:

Estação de SJRP:

$$d_e = 2,553e_i - 6,396n_i$$

$$d_n = -10,00e_i + 20,00n_i$$

Estação de SPAR:

$$d_e = 2,553e_i - 6,396n_i$$

$$d_n = -10,00e_i + 20,00n_i$$

Estação de SPAR:

$$d_e = 3,073e_i - 4,316n_i$$

$$d_n = -6,779e_i + 9,552n_i$$

Estação de ROSA:

$$d_e = 2,985e_i - 4,193n_i$$

$$d_n = -6,914e_i + 9,712n_i$$

Estação de ILHA:

$$d_e = 2,995e_i - 4,165n_i$$

$$d_n = -7,740e_i + 10,00n_i$$

Estação de OURI:

$$d_e = 1,111e_i - 1,560n_i$$

$$d_n = -6,178e_i + 8,678n_i$$

Estação de PPTE:

$$d_e = 2,985e_i - 4,193n_i$$

$$d_n = -6,914e_i + 9,712n_i$$

Um das possíveis explicações para as variações encontradas entre as estações da Rede GNSS/SP tanto para o caso linear e para o caso angular, é a presença de uma falha geológica no oeste do estado de São Paulo que pode ter influenciado na variação. A figura 4 mostra as principais falhas geológicas no Brasil e a sobreposição com a área compreendida pelas estações.



Fig. 5 - Principais falhas geológicas no território brasileiro.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os programas Gamit e Globk como ferramenta de processamento permitiram estimar a posição das estações da Rede GNSS/SP, de onde se obtém as diversas bases, as coordenadas e sua Matriz Variância Covariância (MVC). Assim, foi possível estudar uma estratégia de processamento mais adequada, baseado nos centros de processamento do SIRGAS, minimizando alguns fatores que viessem a afetar o resultado final do experimento.

Foi possível perceber que os parâmetros estimados e a MVC dos mesmos apresentaram bons resultados, já que os desvios padrão apresentados possuem valores pequenos, e com a análise de arquivo interno do GAMIT, que fornece dados dos processamentos diários, apresentou erro médio quadrático aceitável, bem como soluções das ambiguidades.

O objetivo principal do trabalho foi atingido, pois foram estimadas as coordenadas e a MVC das estações da Rede GNSS/SP analisadas. Com base nesses dados foram determinados os deslocamentos e aplicado o Teste de Congruência Global (TCG). Verificado a estabilidade das estações de referência e a provável movimentação nas estações da rede GNSS/SP foram estimados os parâmetros de deformação com base nos fundamentos da teoria da elasticidade.

A análise dos resultados do TCG indicou possíveis deslocamentos nas estações analisadas. A indicação dos pontos que sofreram movimentos entre as campanhas. Entre as campanhas 1 e 2 a estação de PPTE; entre as campanhas 1 e 3 as estações PPTE, ROSA, ILHA; entre as campanhas 1 e 4 as estações PPTE, ROSA, ILHA e SJRP; Entre as campanhas 1 e 5 PPTE, ROSA, ILHA, SJRP, SPAR e OURI; Entre as campanhas 1 e 6 PPTE, ROSA, ILHA, SJRP, SPAR e OURI; finalmente entre as campanhas 1 e 7 as estações PPTE, ROSA, ILHA, SJRP, SPAR e OURI.

Analisando todos os resultados, percebe-se que quanto mais próximos os valores do deslocamento e às respectivas MVC, o TCG indica aceitável para todos os níveis de α . Porém, à medida que esses valores se distanciam o TCG indica rejeição.

Os deslocamentos das estações tiveram uma mesma direção pra o Norte, indicando

uma tendência para essa direção. Isso porque a movimentação da placa Sul Americana apresenta esse mesmo tipo de movimentação.

Os valores dos parâmetros deformação para cada uma das estações estudadas foram estimados e com isso pode ser utilizado como complementação de estudos tectônicos intraplaca.

Em relação ao uso do GNSS, a técnica mostrou grande potencialidade em relação à aplicação do trabalho, devido à qualidade dos resultados sendo possível determinar parâmetros de pequena magnitude e com alta confiabilidade.

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio concedido através da bolsa de Mestrado junto ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIESSY G., MOREAU F., DAUTEUIL O., BOUR O., 2011. **Surface deformation of an intraplate area from GPS time series**. Journal of Geodynamics, Vol. 52, p. 24-33.
- CABRAL, J. J. S. P., SANTOS, S. M., PONTES FILHO, I. D. S. P., 2006. **Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 11, No. 3, p. 147-157.
- CALAI E., HAN J.Y., DEMETS C., NOCQUET J.M., 2006. **Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements**. Journal of Geophysics, Vol. 111, B06402, doi: 10.1029/2005JB004253. 23 p.
- CASPARY, W. F., 2000. **Concepts of Network end Deformation Analysis**. Edited by J.M. Rueger. School of Geomatic Engineering, University of New South Wales. 183 p.
- CHRZANOWSKI, A., 1986. **Geotechnical and other non-geodetic method in deformation measurement**. In: **Proceedings of the Deformation Measurement Workshop**. Oct 31 - Nov 1, Ed: Yehuda Bock, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., p. 170-206.

- COSTA, S. M. A.; SILVA, A. L.; VAZ, J. A., 2009. **Avaliação do processamento da rede SIRGAS-CON pelo centro de análises IBGE.** Presented at the XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Mendoza, Argentina, p. 142-147.
- FAZAN, J. A., 2010. **Aplicação do teste de congruência global e análise geométrica para detecção de deslocamentos em redes geodésicas: estudo de caso na UHE de Itaipu.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de transportes, São Paulo. 277 p.
- GEMAEL, C., 1994. **Introdução ao Ajustamento de Observações.** Editora UFPR, Curitiba. 319 p.
- HERRING, T. A.; KING, R. W.; MCCLUSKY, S.C., 2009. **Introduction to GAMIT/GLOBK.** Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. 48 p.
- KUANG, S., 1996. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: concepts and applications.** Chelsea: Ann Arbor Press. 368 p.
- SANTOS, M. C., 1999. **Estabilidade das Estruturas Geodésicas.** Curitiba: UFRPR. 74 p.
- TEIXEIRA, N. N., 2005. **Análise geodésica de deformações da crosta em regiões de grandes barragens a partir de deslocamentos tridimensionais obtidos pelo sistema de posicionamento global.** Dissertação de Mestrado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 294 p.