

ALESSANDRO SALLES CARVALHO

**IMPLICAÇÕES DO EMPREGO DE DIFERENTES MODELOS DE
VELOCIDADES E PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT
NO POSICIONAMENTO GEODÉSICO NA PLACA SUL-AMERICANA**

Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do título
de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C331i
2015

Carvalho, Alessandro Salles, 1981-

Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa sul-americana / Alessandro Salles Carvalho. – Viçosa, MG, 2015.

xii, 188f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: William Rodrigo Dal Poz.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 178-188.

1. Geodésia. 2. Sistema de Posicionamento Global - Aplicações. 3. Satélites artificiais de navegação. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. II. Título.

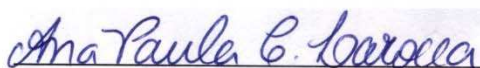
CDD 22. ed. 526.1

ALESSANDRO SALLES CARVALHO

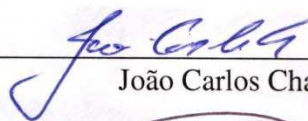
**IMPLICAÇÕES DO EMPREGO DE DIFERENTES MODELOS DE
VELOCIDADES E PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT
NO POSICIONAMENTO GEODÉSICO NA PLACA SUL-AMERICANA**

Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do título
Doctor Scientiae.

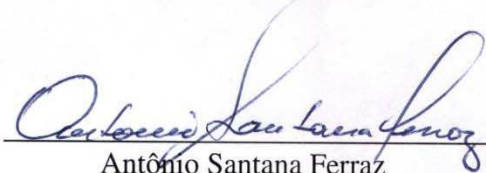
APROVADA: 10 de dezembro de 2015.



Ana Paula Camargo Larocca



João Carlos Chaves



Antônio Santana Ferraz



Dalto Domingos Rodrigues
(Coorientador)



William Rodrigo Dal Poz
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Ao autor da vida, Jesus, pela força, paz, consolo e por se fazer tão presente em minha vida.

Ao professor Dr. William Rodrigo Dal Poz pela orientação, incentivo e amizade.

Aos professores doutores Antônio Santana Ferraz, Dalto Domingos Rodrigues, Joel Gripp Junior e Dra. Sonia Maria Alves da Costa pelas importantes contribuições apresentadas no exame de qualificação.

Aos professores do Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela amizade e ensinamentos.

Aos professores do Departamento de Transporte e Geotecnia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), pelo apoio e incentivo.

Ao professor Dr. Corné Kreemer da *University of Nevada* pelos dados do modelo GSRM V.2.1 e ao Dr. Donald Argus do *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* pela disponibilização dos dados do modelo GEODVEL2010 (NNR).

Ao amigo Sandro Henrique de Faria por sua amizade, companhia nos estudos e nas inúmeras viagens de Juiz de Fora à Viçosa, MG.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Cilene Knauf, pela amizade.

Aos meus pais (Sales e Marta), irmãos (Luciano e Jaqueline) e à minha esposa (Daniela) pelo incentivo, compreensão, carinho e amizade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	V
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.1.1 Objetivo Geral.....	9
1.1.2 Objetivos Específicos.....	9
1.1.3 Justificativa	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERÊNCIA	11
2.2 RELACIONAMENTO ENTRE SISTEMAS DE REFERÊNCIA	14
2.3 PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO PARA MUDANÇA DE REFERENCIAL DAS COORDENADAS E VELOCIDADES	18
2.4 PROPAGAÇÃO DE VARIÂNCIA NA ATUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS E NA MUDANÇA DE REFERENCIAL DAS COORDENADAS E VELOCIDADES.....	22
2.4.1 Propagação de variância na atualização dos parâmetros.....	22
2.4.2 Propagação de variância na mudança de referencial das coordenadas	23
2.4.3 Propagação de variância na mudança de referencial das velocidades	24
2.5 CÁLCULO DE VELOCIDADE DAS ESTAÇÕES COM BASE NAS COORDENADAS DO POLO DE EULER E VETOR VELOCIDADE ANGULAR PARA UMA PLACA TECTÔNICA	24
2.6 ATUALIZAÇÃO DAS COORDENADAS CARTESIANAS GEOCÊNTRICAS	28
2.6.1 Propagação de variância na determinação das velocidades e na atualização de coordenadas.....	28
2.7 PROPAGAÇÃO DE VARIÂNCIA DAS COORDENADAS CARTESIANAS PARA GEODÉSICAS ..	32
2.8 CÁLCULO DE VELOCIDADES, AZIMUTES E PROPAGAÇÃO DE VARIÂNCIA NO SISTEMA GEODÉSICO LOCAL (SGL)	32
2.9 MODELOS DE VELOCIDADES PARA A PLACA SUL-AMERICANA (SOAM)	34
2.9.1 ITRF2000-PMM, ITRF2005-PMM e ITRF2008-PMM.....	35
2.9.2 SOPAC <i>Plate Motion Model</i> (SOPAC PMM).....	39
2.9.3 APKIM (<i>Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model</i>)	41
2.9.4 Modelo NUVEL (NNR-NUVEL1 e NNR-NUVEL1A).....	44
2.9.5 MORVEL56.....	46
2.9.6 GEODVEL (NNR).....	49
2.9.7 REVEL2000.....	50
2.9.8 <i>Global Strain Rate Model</i> – GSRM.....	51
2.9.9 Modelo de Velocidade de Costa, Santos e Gemaél (2003).....	53
2.9.10 Modelo de Velocidade de Souza (2013).....	55
2.9.11 Modelo de Velocidade de Souza e Garnés (2014).....	57
2.9.12 Modelo de Velocidade MV_Carvalho	59
2.9.13 Modelo de Velocidade para o SIRGAS	61
2.9.13.1 VEMOS2009 (Velocity Model for SIRGAS - 2009).....	62
3 MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1 MATERIAIS	66
3.2 MÉTODOS	67
3.2.1 Planejamento das sessões GPS e Ajustamento	67
3.2.2 Ajustamento das componentes dos vetores linha de base	69

3.2.3 Testes estatísticos empregados no ajustamento	73
3.2.3.1 Teste Qui-quadrado (χ^2)	73
3.2.3.2 Teste data Snooping	74
3.2.4 Modelagem matemática para estimação dos 14 parâmetros de transformação entre referenciais	76
3.2.5 Estimação das coordenadas do polo de Euler e vetor velocidade angular para a placa SOAM.....	79
3.2.6 Estimação dos parâmetros de transformação, época 2000,4, do ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000)	82
3.2.7 Interpolação das velocidades das estações com base no gride VEMOS2009.....	84
3.2.8 Etapas seguidas nos experimentos e cálculos das discrepâncias posicionais	87
4 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES	94
4.1 EXPERIMENTO 1	95
4.1.1 Resultados e análise.	96
4.2 EXPERIMENTO 2	117
4.2.1 Resultados e análise.	120
4.3 EXPERIMENTO 3	138
4.3.1 Resultados e análise.	141
4.4 EXPERIMENTO 4	153
4.4.1 Resultados e análise.	154
4.5 EXPERIMENTO 5	162
4.5.1 Resultados e análise.	164
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	172
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	178

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição espacial das estações do IGS que materializam o IGB08.....	13
Figura 2 - Geometria da mudança de referencial do sistema de referência origem (o) para o sistema destino (d).....	15
Figura 3 - Estações empregados na estimação dos parâmetros de transformação de ITRF2005 para ITRF2000.....	20
Figura 4 - Estações empregadas na determinação dos parâmetros de transformação do ITRF2008 para o ITRF2005.....	21
Figura 5 - Polo de Euler (P_E) na esfera.....	25
Figura 6 - Vetores velocidades das estações utilizadas na estimação dos vetores de Euler.....	36
Figura 7 - Estações próximas a limites de placas, zonas de deformação e áreas de ajuste glacial isostático.....	37
Figura 8 - Velocidades horizontais no ITRF2008.....	38
Figura 9 - Comparação das velocidades obtidas com os modelos SOPAC e ITRF2000.....	40
Figura 10 - Vetores velocidades de algumas estações determinados com base nos modelos APKIM2005 e PB2002.....	43
Figura 11 - Vetores velocidades de algumas estações determinados com base nos modelos APKIM2008D e PB2002.....	43
Figura 12 - Placas tectônicas e zonas de deformação segundo o modelo APKIM2005.....	44
Figura 13 - Placas tectônicas segundo o modelo NUVEL 1.....	46
Figura 14 - Geometria dos limites de placas empregado no MORVEL.....	46
Figura 15 - Localização de estações GPS.....	47
Figura 16 - Geometria global das placas tectônicas.....	48
Figura 17 - Abreviação e nome das placas tectônicas segundo o modelo NNR-MORVEL56.....	48
Figura 18 - Velocidades horizontais no ITRF97 segundo o modelo REVEL2000.....	51
Figura 19 - Localizações das estações com velocidades conhecidas.....	51
Figura 20 - Localização das estações nas placas estáveis (suposição).....	52
Figura 21 - Distribuição das estações da RBMC e IGS.....	54
Figura 22 - Localização das estações da RBMC e IGS.....	55
Figura 23 - Estações selecionadas para a modelagem da placa Sul-Americana.....	57
Figura 24 - Localização das estações utilizadas na modelagem da placa SOAM.....	58
Figura 25 - Distribuição espacial das 40 estações da RBMC/SIRGAS-CON.....	59
Figura 26 - Velocidades das estações obtidas com 19 modelos de movimento da placa SOAM.....	60
Figura 27 - Campo de velocidade para a América do Sul de Caribe.....	63
Figura 28 - Grade de velocidade do VEMOS2009.....	63
Figura 29 - Vetores velocidades nas estações da rede SIRGAS.....	64
Figura 30 - Modelo de deformação para o VEMOS2014 (esquerda) e VEMOS2009 (direita).....	65
Figura 31 - Transporte de coordenadas sem observações redundantes.....	68
Figura 32 - Transporte de coordenadas com observações redundantes.....	68
Figura 33 - Rede formada por todas as linhas de base possíveis (dependentes e independentes).....	69
Figura 34 - Rede formada por linhas de base independentes.....	69
Figura 35 - Fluxograma contendo a metodologia usada para estimação dos parâmetros.....	83
Figura 36 - Estações da RBMC empregadas na estimação e validação interna e externa dos parâmetros de transformação.....	84

Figura 37 - Esquema empregado na interpolação pelo inverso da distância.....	85
Figura 38 - Etapas para determinação das velocidades nos referenciais desejados dos pontos de interesse.	87
Figura 39 – Procedimentos aplicados no cenário 1 na determinação posicional das estações de interesse.	90
Figura 40 – Procedimentos aplicado no cenário 2 na determinação posicional das estações de interesse.	91
Figura 41- Tela do aplicativo empregado na mudança de referencial e atualização.	93
Figura 42 - Procedimentos adotados na execução dos experimentos 2, 3 e 4.....	95
Figura 43 - Discrepâncias para as latitudes, longitudes e altitude elipsoidal.	97
Figura 44 - Discrepâncias planimétricas e tridimensionais.	98
Figura 45 - Discrepâncias para as latitudes, longitudes e altitude elipsoidal.	99
Figura 46 - Discrepâncias planimétricas e tridimensionais.	99
Figura 47 - RMS das discrepâncias planimétricas.....	101
Figura 48 - RMS das discrepâncias planimétricas com uso dos parâmetros PT_Carvalho. .	104
Figura 49 - RMS das discrepâncias planimétricas com base nos parâmetros IBGE-PPP.....	104
Figura 50 - RMS das discrepâncias planimétricas com base nos parâmetros do IERS.....	104
Figura 51 - RMS das discrepâncias altimétricas.	105
Figura 52 - RMS das discrepâncias tridimensionais.	107
Figura 53 - RMS _{D3D} obtidos com uso dos parâmetros PT_Carvalho e modelos de velocidades.	110
Figura 54 - RMS _{D3D} obtidos com base nos parâmetros IBGE-PPP e modelos de velocidades.	111
Figura 55 - RMS _{D3D} obtidos com base nos parâmetros do IERS e modelos de velocidades.	111
Figura 56 - Posicionamento relativo no Brasil. As setas indicam o sentido do vetor linha de base.	119
Figura 57 - Posicionamento relativo na Argentina. As setas indicam o sentido do vetor linha de base.	120
Figura 58 - Boxplots das discrepâncias planimétricas em função do tratamento.....	129
Figura 59 - Boxplots das D2D em função do tratamento.	131
Figura 60 - RMS _{D2D} e RMS _{D3D}	136
Figura 61 - Posicionamento relativo em rede no Brasil.	139
Figura 62 - Posicionamento relativo em rede na Argentina.	140
Figura 63 - Rede geodésica no Brasil.....	142
Figura 64 - Rede geodésica na Argentina.....	143
Figura 65 - Boxplots das discrepâncias planimétricas no Brasil.	148
Figura 66 - RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais.	149
Figura 67 - Média e coeficiente de variação para as D2D.....	150
Figura 68 - Boxplots das discrepâncias planimétricas na Argentina.....	150
Figura 69 - RMS para discrepâncias planimétricas e tridimensionais.....	152
Figura 70 - Média e coeficiente de variação para as D2D.....	152
Figura 71 - Boxplots das discrepâncias planimétricas.	154
Figura 72 - RMS para as D2D e D3D.	155
Figura 73 - Média e coeficiente de variação para as D2D.....	157
Figura 74 - Boxplots das D2D em função do tratamento.	158
Figura 75 - RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais.	160
Figura 76 - Média e coeficiente de variação para as D2D.....	161
Figura 77 - Tela principal do serviço AUSPOS.	163
Figura 78 - Estações da rede IGS, APREF, RAMSAC e RBMC.....	164
Figura 79 - Boxplots discrepâncias planimétricas na Argentina.	165

Figura 80 - Média e coeficiente de variação para as D2D.....	166
Figura 81 - RMS_{D2D} e RMS_{D3D}	167
Figura 82 - Boxplots discrepâncias planimétricas.....	169
Figura 83 - Média e coeficiente de variação para as D2D.....	170
Figura 84 - RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais.....	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de transformação e suas respectivas variações temporais.	19
Tabela 2 - Parâmetros da transformação do ITRF2008 para ITRF2005 – época 2005,0 e respectivas precisões.....	19
Tabela 3 - Parâmetros de transformação do ITRF2005 para ITRF2000 - época 2000,0.	20
Tabela 4 - Polo de Euler e velocidade angular da placa SOAM.	38
Tabela 5 - Componentes cartesianas da velocidade angular.	39
Tabela 6 - Variações da origem do referencial.....	39
Tabela 7- Polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.	40
Tabela 8 - Componentes da velocidade angular para a placa SOAM.	41
Tabela 9 - Polo de Euler e Velocidade angular para a placa SOAM.....	41
Tabela 10 - Componentes cartesianas da velocidade angular da placa SOAM.....	41
Tabela 11 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.....	43
Tabela 12 - Velocidades angulares para a placa Sul-Americana.....	44
Tabela 13 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.....	45
Tabela 14 - Componentes do vetor velocidade angular para a placa SOAM.....	45
Tabela 15 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular.	48
Tabela 16 - Velocidades angulares para a placa Sul-Americana.....	48
Tabela 17 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular.	49
Tabela 18 - Velocidade de translação do referencial das velocidades.	49
Tabela 19 - Velocidades angulares para a placa Sul-Americana.....	49
Tabela 20 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular.	50
Tabela 21- Componentes da velocidade angular da placa SOAM.	50
Tabela 22 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.....	52
Tabela 23 - Componentes cartesianas do vetor velocidade angular.....	53
Tabela 24 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular.	54
Tabela 25 - Componentes da velocidade angular para a placa SOAM.	54
Tabela 26 - Componentes da velocidade angular da placa SOAM.	55
Tabela 27 - Parâmetros de rotação para a placa SOAM.....	56
Tabela 28 - Parâmetros de rotação para a placa SOAM.....	58
Tabela 29 - Componentes e precisões da velocidade angular da SOAM.....	60
Tabela 30 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular e respectivas precisões.	60
Tabela 31- Direção e magnitude médias das velocidades das estações da Figura 26.	61
Tabela 32 - Parâmetros do polo de Euler para a placa SOAM.....	65
Tabela 33 - Componentes da velocidade angular da placa Sul-Americana.	65
Tabela 34 - Parâmetros de transformação do ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000), na época 2000,4.....	97
Tabela 35 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais.	98
Tabela 36 - Parâmetros de transformação, suas variações e respectivas precisões.....	99
Tabela 37 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais.	100
Tabela 38 - RMS das discrepâncias planimétricas (em metros).....	100
Tabela 39 - RMS das discrepâncias planimétricas (em metros).....	102
Tabela 40 - RMS das discrepâncias planimétricas (em metros).....	102
Tabela 41 - RMS das discrepâncias planimétricas (em metros).....	103
Tabela 42 - RMS das discrepâncias altimétricas.....	105
Tabela 43 - RMS das discrepâncias tridimensionais (em metros).....	106
Tabela 44 - RMS _{D3D} obtidos om base em PT_Carvalho e diferentes modelos de velocidade.	107

Tabela 45 - RMS _{D3D} obtidos om base em IBGE-PPP e diferentes modelos de velocidade. ...	108
Tabela 46 - RMS _{D3D} obtidos om base em IERS e modelos de velocidade.....	108
Tabela 47 - Diferença dos valores dos RMS _{D3D}	110
Tabela 48 - Estatísticas para as discrepâncias altimétricas, planimétricas e tridimensionais.	111
Tabela 49 - Estatísticas para as discrepâncias altimétricas, planimétricas e tridimensionais.	113
Tabela 50 - Estatísticas para as discrepâncias altimétricas, planimétricas e tridimensionais.	114
Tabela 51 - Estações de controle e de interesse empregadas no posicionamento relativo no Brasil.....	119
Tabela 52 - Estações de controle e de interesse empregadas no posicionamento relativo na Argentina.	120
Tabela 53 - Componentes vetoriais das linhas de base – Brasil.....	121
Tabela 54 - Componentes vetoriais das linhas de base – Argentina.	121
Tabela 55 - Coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivos sigmas das estações localizadas no Brasil.....	122
Tabela 56 - Coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivos sigmas das estações localizadas na Argentina.	122
Tabela 57 - Coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivos sigmas das estações localizadas no Brasil.....	123
Tabela 58 - Resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping a 5% de significância.	123
Tabela 59 - Coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivos sigmas das estações localizadas na Argentina.	124
Tabela 60 - Resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping a 5% de significância.	124
Tabela 61 - Coordenadas e velocidades cartesianas das estação da RBMC.	125
Tabela 62 - Coordenadas e velocidades cartesianas das estação da RAMSAC.	125
Tabela 63 - Coordenadas e respectivos sigmas para estações da RBMC.....	125
Tabela 64 - Resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping a 5% de significância.	126
Tabela 65 - Coordenadas e velocidades das estações de interesse da RBMC.....	126
Tabela 66 - Coordenadas e respectivos sigmas para estações da RAMSAC.	127
Tabela 67 - Resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping a 5% de significância.	127
Tabela 68 - Coordenadas e velocidades das estações de interesse.....	127
Tabela 69 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais com base nos sete transportes de coordenadas no Brasil.....	129
Tabela 70 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais com base nos sete transportes de coordenadas na Argentina.	132
Tabela 71 - Coordenadas e velocidades no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).....	134
Tabela 72 - Coordenadas e velocidades no POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632).....	135
Tabela 73 - RMS das discrepâncias posicionais.....	136
Tabela 74 - RMS _{D2D} e RMS _{D3D}	137
Tabela 75 - Linhas de base da rede GPS localizada no Brasil.	139
Tabela 76 - Linhas de base da rede GPS localizada na Argentina.	140
Tabela 77 - Componentes vetoriais das linhas de base da rede localizada no Brasil.	141
Tabela 78 - Resultados dos testes estatísticos no ajustamento injuncionado	142
Tabela 79 - Componentes vetoriais das linhas de base da rede localizada na Argentina.....	143
Tabela 80 - Resultados dos testes estatísticos no ajustamento injuncionado	144
Tabela 81 - Coordenadas e precisões no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).	145
Tabela 82 - Coordenadas e velocidades no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).....	146
Tabela 83 - Coordenadas e velocidades no SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4).....	146
Tabela 84 - Coordenadas e precisões no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).	146

Tabela 85 - Coordenadas e velocidades no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).....	147
Tabela 86 - Coordenadas e velocidades POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632).	147
Tabela 87 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais (DP).	148
Tabela 88 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais (DP).	151
Tabela 89 - Medidas estatísticas para D2D e D3D.....	154
Tabela 90 - RMS da D2D ordenados do menor para o maior valor.....	156
Tabela 91 - Média da D2D ordenadas do menor para o maior valor.	157
Tabela 92 - Medidas estatísticas para D2D e D3D.....	159
Tabela 93 - RMSD2D ordenados do menor para o maior valor.....	160
Tabela 94 - Média da D2D ordenadas do menor para o maior valor.	161
Tabela 95 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais (DP).	165
Tabela 96 - Uso os modelos ranqueados do menor para o maior valor do RMS_{D2D}	168
Tabela 97 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais.	169
Tabela 98 - Uso os modelos ranqueados do menor para o maior valor do RMS_{D2D}	172

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTINFO	<i>Antenna Information Format</i>
APKIM	<i>Actual Plate Kinematic Model</i>
APREF	<i>Asia-Pacific Reference Frame</i>
AUSPOS	<i>Online GPS Processing Service</i>
BIH	<i>Bureau International de l'Heure</i>
DGFI	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Munich</i>
DORIS	<i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSRM	<i>Global Strain Rate Model</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGS-RNAAC-	<i>IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS</i>
IGN	<i>Instituto Geográfico Nacional – República Argentina</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LGO	<i>Leica Geo Office</i>
MORVEL 56	<i>Mid-Ocean Ridge VElocity</i>
MVC	<i>Matriz Variância-Covariância</i>
NNR	<i>No Net Rotation</i>
NUVEL	<i>Northern University Model</i>
POSGAR	<i>Posiciones Geodésicas Argentinas</i>
PCO	<i>Phase Center Offset</i>
PCV	<i>Phase Center Variation</i>
RMS	<i>Erro Quadrático Médio</i>
RAMSAC	<i>Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
SIRGAS	<i>Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas</i>
SIRGAS-CON	<i>Rede SIRGAS de operação contínua</i>
SGB	<i>Sistema Geodésico Brasileiro</i>
SGL	<i>Sistema Geodésico Local</i>
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SOPAC	<i>Scripps Orbit and Permanent Array Center</i>
VLBI	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>
VEMOS	<i>VELOCITY MOdel for Sirgas</i>
WGS84	<i>World Geodetic System</i>
WRMS	<i>Weighted Root Mean Square</i>

RESUMO

CARVALHO, Alessandro Salles, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2015.
Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa sul-americana.
Orientador: William Rodrigo Dal Poz. Coorientadores: Dalto Domingos Rodrigues e Joel Gripp Junior.

As efemérides precisas IGS (*International GNSS Service*) empregadas nos posicionamentos precisos estão desde 07/10/2012 referenciadas ao sistema IGB08 (ITRF2008). Assim, após processamento dos dados GPS (*Global Positioning System*) são gerados vetores linha de base e coordenadas no mesmo referencial e época das efemérides precisas. A disponibilidade gratuita de observações GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) de estações das redes RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo) na Argentina e RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) no Brasil facilitou a realização de experimentos relacionados a sistemas geodésicos de referência nestes dois países. O Brasil emprega o sistema de referência SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e a Argentina o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) para determinação da posição e, portanto, torna-se necessário realizar a compatibilização de referencial e época nos posicionamentos geodésicos. Na atualização das coordenadas das estações foram empregados 19 modelos de velocidade para a placa tectônica Sul-Americana (SOAM), dentre os quais, um foi modelado neste trabalho. O aplicativo desenvolvido GEO_TRANSF_REF_ATUALI possibilita a escolha dos 19 modelos de velocidades para a placa SOAM e realiza os procedimentos de atualização e mudança de referencial das coordenadas e velocidades. No experimento 1, os parâmetros de transformação do IGB08 (ITRF2008) para o SIRGAS2000 (ITRF2000) foram estimados e os resultados de sua aplicação no Brasil foram comparados com o emprego dos parâmetros do IERS e do IBGE-PPP. Pôde-se, também, verificar a influência da atualização das coordenadas com base em 19 modelos de velocidades na determinação da posição. Nos experimentos 2 e 3, os posicionamentos relativos foram executados com base em transporte de coordenadas e solução em rede e não foram detectadas melhoras na qualidade do posicionamento com a compatibilização de referencial e época. Nesses experimentos, as coordenadas semanais de estações das redes RBMC e RAMSAC que pertencem a rede SIRGAS-CON também foram empregadas e, após aplicação da mudança de referencial e atualização das coordenadas do (ITRF2008, época 2015,594) para os sistemas SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) e vice-versa foi possível quantificar a qualidade do posicionamento e identificar os melhores modelos de velocidade. No experimento 4, as

coordenadas das estações de controle empregadas no ajustamento injuncionado das duas redes são provenientes da solução semanal da rede SIRGAS-CON. Na rede localizada no Brasil, comparando as coordenadas estimadas no cenário 1 do experimento 3 com as obtidas neste experimento não foi verificado melhora da qualidade do posicionamento, mas poderá haver piora a depender da escolha do modelo. Na rede localizada na Argentina houve melhora com aplicação do procedimento de transformação e atualização de coordenadas em relação à não aplicação desses procedimentos. Foi possível identificar os modelos que proporcionaram menores valores para o RMS das discrepâncias planimétricas. No experimento 5, o serviço AUSPOS que realiza o posicionamento relativo em rede, foi empregado para a determinação posicional no Brasil e na Argentina e pôde-se verificar a influência do emprego dos diferentes modelos de velocidade na atualização das coordenadas e a necessidade da compatibilização de referencial e época.

ABSTRACT

CARVALHO, Alessandro Salles, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2015. **Implications of employ different models of velocity and Helmert transformation parameters in the geodesic positioning on south american plate.** Advisor: William Rodrigo Dal Poz. Co-advisors: Dalto Domingos Rodrigues and Joel Gripp Junior.

The IGS (International GNSS Service) precise ephemeris used in precise positions are referenced from 10/07/2012 to reference frame IGB08 (ITRF2008). Thus, after GPS data (Global Positioning System) processing are generated baseline vectors and coordinate in the same reference and epoch of the precise ephemeris. The free availability of GNSS observations (Global Navigation Satellite Systems) of RAMSAC networks stations (Argentine Network for Continuous Satellite Monitoring) in Argentina and RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS Systems) in Brazil, facilitated the realization of associated experiments to geodetic reference frames in these two countries. The Brazil employs the reference frame SIRGAS2000 (ITRF 2000 epoch 2000.4) and Argentina use the POSGAR07 (ITRF2005, epoch 2006.632) to determine the position, so, is necessary to make compatible the referential and epoch in the geodetic positioning. In the updating of the coordinates of the stations were used 19 velocity models for the tectonic plate in South America (SOAM), among these one was modeled in this work. The application developed called GEO_TRANSF_REF_ATUALI offers the choice of 19 velocity models for SOAM plate and the realization of the upgrade and referential change procedures of the coordinates and velocities. In experiment 1, the transformation parameters of the IGB08 (ITRF2008) for SIRGAS2000 (ITRF2000) were estimated and the results this application in Brazil were compared with the use of the IERS and IBGE-PPP parameters. Was possible to verify the influence of the coordinates update based on 19 velocity models in the position determination. In experiments 2 and 3, the relative positioning was executed based on coordinate transport and network solution and was not detected improvements in positioning quality with the compatibility of referential and epoch. In these experiments, the weekly coordinate of stations of the RBMC and RAMSAC networks, belonging to SIRGAS-CON network were also employed and after the application of the referential change and coordinates update of the (ITRF2008, epoch 2015.594) for SIRGAS2000 systems (ITRF2000, epoch 2000.4) and POSGAR07 (ITRF2005, epoch 2006.632) and vice versa was possible to quantify the quality of positioning and identify the best velocity models. In experiment 4, the coordinates of the control stations employed in constrained adjustment of the two networks are from SIRGAS-CON network weekly solution. In the network located in Brazil, comparing the coordinates

estimated in experiment 3, scenario 1, with those obtained in this experiment was not verified improves the quality of positioning, but will can be worse depending on the choice of model. In the network located in Argentina had improved with the application of transformation and coordinates update procedure in relation to the non-application of these procedures. Was possible to identify the models that provided lower values for the RMS of planimetric discrepancies. In experiment 5, the AUSPOS service that realize the relative positioning in network, was used for positional determination in Brazil and Argentina and was able to check the influence of the use of different speed models in the coordinates updating and need compatibility of reference and epoch.

1 INTRODUÇÃO

Geodésia é a ciência da mensuração e do mapeamento da superfície da Terra, incluindo a determinação do seu campo da gravidade, da superfície do fundo oceânico e de suas variações temporais (TORGE, 2001; SEEBER, 2003). As medições dessas variações são possíveis devido a acurácia proporcionada pelos modernos sistemas de medidas e métodos geodésicos (HERRING, 2007). A exemplo, a quantificação da variação temporal das coordenadas tem sido realizada com base em medições por GPS (*Global Positioning System*) que possibilitam o posicionamento geodésico com acurácia suficiente para a modelagem de distintos movimentos sobre a crosta terrestre (SEEBER, 2003; ZAMORA et al., 2014). E, segundo Zeki (2014), uma das aplicações bem sucedidas do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) é o monitoramento a longo prazo (*long-term*) dos movimentos da crosta terrestre. O sistema GPS tem sido empregado também na implantação de redes geodésicas, no monitoramento de estruturas naturais ou artificiais, na determinação de velocidades das estações (com base em séries temporais das coordenadas), na determinação de deslocamentos e deformações de placas tectônicas, entre outras aplicações (TEIXEIRA; FERREIRA, 2005; MARJANOVIĆ; BAČIĆ; BAŠIĆ, 2012; PARK; KIM; LEE, 2013; CALDAS; CHAVES, 2015).

O GNSS e outras técnicas da geodésia espacial permitiram o desenvolvimento de sistemas de referência geocêntricos que são materializados por redes de referência (globais, regionais e locais) e possibilitam o estudo detalhado das deformações na superfície da crosta terrestre (BRUNINI; SÁNCHEZ, 2013; INEG, 2015). O sistema de referência terrestre internacional ITRS (*International Terrestrial Reference System*) é o referencial definido e sua materialização é denominada de ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). Nesse sistema é possível modelar e monitorar a variação temporal das coordenadas das estações geodésicas na superfície física da Terra devido aos efeitos geofísicos (tectônica e deformações devido às marés). A rede de referência global ITRF é mantida pelo IERS (*International Earth and Rotation and Reference Systems Service*) e tem sido adotada internacionalmente como a base para o estabelecimento e atualização das redes geodésicas nacionais e regionais (INEG, 2015). O ITRF é a melhor realização do ITRS, por meio de sua origem, orientação dos eixos, escala e evolução temporal e, na prática, é dado pelo conjunto de estações geodésicas (redes) com coordenadas, velocidades e respectivas precisões em um determinado referencial e época (GT2, 2003; PETIT; LUZUM, 2010). Na realização das atividades

geodésicas é necessário estabelecer um sistema de referência compatível com a acurácia proporcionada pelos métodos atuais de posicionamento e com os sistemas geodésicos de referência adotados no restante do globo terrestre e, com esse objetivo, foi estabelecido o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) (IBGE, 2015).

O SIRGAS é definido de forma idêntica ao ITRS e sua realização é uma densificação regional da rede global ITRF na América Latina e Caribe (SIRGAS, 2015). Está materializado atualmente por uma rede de estações GNSS de funcionamento contínuo com coordenadas de alta precisão (associadas a uma época de referência) e sua atualização/redução para uma época específica é obtida com base nas velocidades das estações (SIRGAS, 2015). No Brasil, adota-se o sistema SIRGAS realizado em 2000,4 (SIRGAS2000, época 2000,4) como a materialização oficial para as atividades geodésicas e cartográficas (IBGE, 2015). As coordenadas da materialização SIRGAS2000 calculadas pelos centros DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*), IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e BEK (*Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung*) referem-se ao ITRF2000, época 2000,4 e corresponde a uma densificação desse ITRF (GT2, 2003; SIRGAS, 2015).

O serviço de posicionamento por ponto IBGE-PPP emprega parâmetros determinados pelo IBGE para transformação do ITRF (IGb08) para SIRGAS2000. Logo, trata-se de parâmetros diferentes dos disponibilizados pelo IERS para transformação do ITRF2008 para ITRF2000. No trabalho “*Rigorous Geodetic Positioning in the Americas*” desenvolvido por Weston e Soler (2012) foram realizadas mudança de referencial e atualização das coordenadas da estação BRFT (Fortaleza) determinadas no IGS08 (ITRF2008, época 2012,6463) para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) com o emprego de ferramentas disponíveis online para determinação das velocidades da estação e mudança de referencial. Portanto, nota-se que estes autores consideraram a compatibilidade do IGb08 com o ITRF2008 e do ITRF2000 com o SIRGAS2000.

No posicionamento relativo com base no GPS onde um ou mais receptores ocupam estações de controle é importante que suas coordenadas estejam no mesmo referencial e época das efemérides precisas empregadas no processamento (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; LEICK, 2004; IBGE, 2008).

As estações geodésicas estão em movimento devido a uma variedade de processos geodinâmicos que vão desde a deriva continental (com uma velocidade quase constante de milímetros a centímetros por ano), às variações de cargas hidrológicas e atmosféricas (as quais produzem, de modo sazonal, alterações nas coordenadas de vários

centímetros); enquanto terremotos mais intensos podem mudar repentinamente (saltos) as coordenadas de centímetros a metros (MOREIRA, 2010; BRUNINI; SÁNCHEZ, 2015). Da Silva, Costa e Vaz (2010), calcularam os deslocamentos de algumas estações da rede SIRGAS-CON em função do terremoto ocorrido em 27/02/2010 no mar da Região de Maule, no Chile, onde foi detectado deslocamento de aproximadamente 3 metros na estação CONZ (Concepción, Chile) a qual está localizada a 115 km do epicentro. Em outras estações no Chile e Argentina foram detectados deslocamentos que variaram de 2 a 30 cm.

Na Argentina, o sistema de referência POSGAR07 (Posiciones Geodésicas Argentinas 2007) tem sido adotado pelo IGN (Instituto Geográfico Nacional) para o posicionamento geodésico desde 15 de maio de 2009 como “Marco de Referência Geodésico Nacional”. É baseado no ITRF2005, época 2006,632 e constitui a materialização no território argentino do mais moderno sistema de referência mundial e compatível com o SIRGAS (IGN, 2015; SIRGAS, 2015).

O posicionamento geodésico no Brasil é realizado na maioria das vezes, com base nas estações de controle (estações de referência) pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) cujas coordenadas estão referenciadas ao SIRGAS2000 (época 2000,4). As estações da RBMC participam da rede SIRGAS-CON (Rede SIRGAS de Operação Contínua) e na materialização do sistema SIRGAS. Essa rede compreende as redes de cobertura continental (SIRGAS-C) e nacional (SIRGAS-N) e é composta, atualmente, por cerca de 400 estações de funcionamento contínuo, das quais 59 pertencem a rede global do IGS e têm suas coordenadas determinadas semanalmente no referencial das efemérides precisas GPS (IGb08) (REBISCHUNG, 2012; SIRGAS, 2015; IGS, 2015). A rede de cobertura continental é uma densificação primária do ITRF na América Latina e as redes nacionais ampliam a rede continental e provê acesso a um referencial nacional e local. As redes continental e nacionais têm as mesmas características e qualidades e cada estação é processada por três Centros de Análises (SIRGAS, 2015).

O IGS realiza periodicamente o referencial empregado na determinação das coordenadas dos satélites GPS (efemérides precisas) (IGS, 2015). Desde a semana GPS 1709 (07/10/2012) até o momento da escrita deste trabalho, a realização IGS do ITRF à qual é alinhada ao ITRF2008 é denominada de IGb08 (REBISCHUNG, 2012). Os parâmetros de transformação do IGb08 para o ITRF2008 são iguais a zero (REBISCHUNG, 2011; NGA, 2014). Desse modo, considera-se a compatibilidade das

realizações IGb08 do IGS e ITRF2008 do IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) e emprega-se os parâmetros estimados pelo IERS na mudança de referencial das coordenadas do SIRGAS2000 (ITRF2000) e POSGAR07 (ITRF2005) para o ITRF2008 (IGb08) e vice-versa.

A mudança de referencial das coordenadas pode ser realizada com base no emprego da transformação de Helmert a sete parâmetros e respectivas variações temporais (*rates*) (três translações, três rotações, um fator de escala e suas variações temporais) (SOLER; SNAY, 2004; TEUNISSEN; HUISMAN; HU, 2013; ITRF, 2015).

A atualização ou redução das coordenadas à uma época de interesse é realizada com base em modelos de velocidades ou com as velocidades das estações obtidas com base em observações GPS coletadas por um período não inferior a dois anos (SIRGAS, 2015; IBGE, 2015). As séries temporais das coordenadas das estações permitem a visualização da tendência do deslocamento da estação no tempo, a identificação de variações bruscas devido a eventos naturais (sismos, carga de precipitação) e a determinação da velocidade da estação assumindo um modelo linear (ZAMORA, et al., 2014). Essas mudanças devem ser monitoradas continuamente e as coordenadas de referência devem ser permanentemente atualizadas para que se mantenha sua acurácia dentro do intervalo aceitável de alguns milímetros para a Geodésia moderna (BRUNINI, SÁNCHEZ, 2013). Os deslocamentos que ocorrem na crosta terrestre levam a mudanças contínuas na configuração geométrica de redes geodésica, de estações e por isso, uma das principais e essenciais aplicações da Geodésia é a determinação de parâmetros que possibilitam a modelagem dos deslocamentos na superfície terrestre (ZEKI, 2014).

De modo geral, os modelos de velocidade possibilitam somente a atualização das coordenadas latitude e longitude, pois as variações verticais são na maioria das vezes são decorrentes de movimentos locais o que dificulta a modelagem regional IBGE (2015).

Na atualização das coordenadas, como já mencionado, necessita-se conhecer as velocidades das estações e diante das diversidades dos modelos, escolher o modelo mais adequado para a região.

Os modelos utilizados neste trabalho estão detalhados no item 2.9. A acurácia das coordenadas atualizadas depende diretamente da confiabilidade do modelo empregado na determinação das velocidades (SIRGAS, 2015).

O emprego do modelo geofísico NNR-NUVEL 1A é recomendado como padrão na determinação das velocidades de estações não próximas às bordas de placas tectônicas (McCARTHY, 1996). De acordo com Drewes e Sánchez (2014), a grande desvantagem

desse modelo é a não inclusão de zonas de deformação entre placas, modelando exclusivamente 13 maiores placas rígidas. Contudo, nota-se que este modelo é empregado não apenas para atualização de coordenadas, mas também para comparações de modelos de movimento de placas tectônicas geofísicos e geodésicos (PIMENTA et al., 2002; COSTA; SANTOS; GEMAEL, 2003; PEREZ; MONICO; CHAVES, 2003; TEIXEIRA; FERREIRA, 2005; SOTO, 2006; FRANCO; MORENO, 2006; STANAWAY; ROBERTZ, 2009; SOUZA, 2013; SOUZA; GARNÉS, 2014; ZEKI, 2014; LIBERAL, 2015).

O processamento preciso dos dados GPS, como já salientado, requer que as coordenadas das estações de referência estejam na mesma época da realização da coleta dos dados e associadas ao mesmo referencial das efemérides precisas empregadas. De acordo com Sirgas (2015), as coordenadas semanais das estações da rede SIRGAS-CON satisfazem essas condições e, por isso, recomenda-se a utilização dessas estações em combinação com suas coordenadas semanais como estações de referência na região.

Desta forma, as coordenadas das estações de interesse obtidas no posicionamento relativo ou por ponto preciso serão determinadas no referencial das efemérides precisas IGS IGb08 (ITRF2008, época da coleta dos dados) e deverão ser transformadas e atualizadas desse referencial e época para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) de modo que haja compatibilização de referencial e época.

Garnés e Souza (2013) estimaram os parâmetros que caracterizam movimento da placa SOAM (*South American Plate*) e realizaram a comparação das velocidades de algumas estações obtidas com estes parâmetros com as velocidades calculadas com os modelos NNR-NUVEL1A; APKIM2000; APKIM 8.8; ITRF2000 PMM; Costa, Santos e Gemael (2003); Perez, Monico e Chaves (2003) e VEMOS2009. Comparando as velocidades obtidas com esses modelos com as obtidas com VEMOS2009 encontraram discrepâncias de até 5 cm em 13 anos para algumas regiões do Brasil. Diante desses resultados, fica evidente que o aumento do intervalo de tempo entre a época de referência e a época da coleta dos dados GPS, implicará no aumento dos valores das discrepâncias.

Além disso, Garnés e Souza (2013) geraram um modelo de movimento para a placa SOAM com base no conceito de polo de Euler e compararam os resultados das velocidades com o modelo VEMOS2009. O modelo VEMOS2009 também foi comparado com o de Perez, Monico e Chaves (2003) e o de Souza (2013) e obtiveram resultados de discrepância máxima de 3 cm para um intervalo de 15 anos para o modelo

gerado. As discrepâncias máximas dos modelos gerados por Perez, Monico e Chaves (2003) e Souza (2013) em relação ao VEMOS2009 foram, respectivamente iguais a 5,2 cm e 2,5 cm para intervalo de tempo de 15 anos.

Pimenta et al. (2002) realizaram experimentos utilizando nove estações em três placas tectônicas os quais transformaram coordenadas do ITRF2000 para os ITRF93 e ITRF97 e as compararam com as soluções disponibilizadas pelo IERS. As velocidades das estações foram obtidas com base no modelo de movimento de placas tectônicas NNR-NUVEL 1A.

Franco e Moreno (2006), realizaram a mudança de referencial coordenadas das estações da rede passiva mexicana do ITRF92, época 1988,0 para ITRF2000, época 2004,0 com base nos parâmetros disponibilizados pelo IERS e nos modelos de movimento de placas tectônicas tais como ITRF200 PMM, NNR-NUVEL 1A e APKIM e propuseram um modelo que possibilita quantificar a influência da mudança de referencial e do deslocamento da placa tectônica na determinação das coordenadas das estações.

Prol et al. (2014) desenvolveram um aplicativo, disponível na web, denominado TREVel (Transformação entre Referenciais e cálculo de Velocidades) que permite a transformação entre coordenadas referenciadas ao ITRF e SIRGAS2000. A atualização das coordenadas nesse sistema é realizada com base nas velocidades obtidas por interpolação linear (inverso da distância) das velocidades da grade do VEMOS2009.

Liberal (2015) empregou os modelos APKIM2005–DGFI, APKIM2005-IGN, ITRF2000 – D&A, NUVEL1A, MORVEL2010 que estão implementados em uma ferramenta disponibilizada pela UNAVCO e o modelo VEMOS2009 para calcular velocidades de estações SIRGAS2000 localizadas nas placas tectônicas do Caribe e da América do Sul. Os resultados obtidos mediante a aplicação desses modelos e suas diferenças em relação ao MORVEL2010 são determinantes na densificação de estações, principalmente na Venezuela e Colômbia com redes materializadas sobre placas distintas. Sugere o emprego do modelo MORVEL2010, pois é o mais recente e de maior cobertura da Terra e conclui que não considerar o efeito do movimento das placas traz como consequência a desatualização das redes geodésicas no desenvolvimento da cartografia básica nos países.

Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) empregaram as coordenadas referenciadas ao SIRGAS2000 (época 2000,4) de 86 estações da RBMC e realizaram a transformação e atualização dessas coordenadas para o ITRF2008 (IGb08, época 2013,5) com base em

três diferentes conjuntos de parâmetros de transformação de Petit e Luzum (2010), Altamimi et al. (2007), IBGE (2013) e 15 modelos de velocidades. Essas coordenadas foram comparadas com as obtidas no sistema IGB08 (época 2013,5) com uso do IBGE-PPP, para processamento dos dados GPS coletados para o dia (15/07/2013). Concluíram que a melhor opção, na média, para a transformação de referencial e atualização das coordenadas no Brasil é obtida com o emprego dos parâmetros disponibilizados em Petit e Luzum (2010) em conjunto com o modelo MORVEL2010. Além disso, verificaram que para cada região do Brasil há uma combinação dos parâmetros de transformação e modelos de velocidade que proporcionam melhor qualidade do posicionamento.

Ressalta-se que, com exceção VEMOS2009, todas as velocidades obtidas nos trabalhos de Liberal (2015) e Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) foram calculadas com base na ferramenta computacional existente no site da UNAVCO¹. No trabalho de Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) não foram realizadas mudanças de referencial das velocidades e no trabalho de Liberal (2015) não há nenhuma citação sobre este fato. Nesta tese, foram implementadas 19 modelos de velocidade para a placa SOAM.

No PPP, as coordenadas de uma estação são obtidas originalmente no referencial das efemérides precisas GPS e na época da coleta dos dados e podem ser obtidas com acurácia centimétrica (KOUBA; HÉROUX, 2001). Assim, para atualização dessas coordenadas para a época 2000,4 deve-se conhecer o vetor velocidade dessa estação. Por exemplo, sendo as coordenadas determinadas na época 2015,87 e a velocidade planimétrica resultante da estação de 1,0 cm/ano, ocorreria um deslocamento posicional em relação à época 2000,4 de 15,47 cm. Estes deslocamentos, de acordo com Seeber (2003) não são toleráveis em redes geodésicas de alta precisão (subcentimétrico). Portanto, é possível realizar um posicionamento preciso, mas não acurado; o que evidencia portanto, a importância da atualização das coordenadas. Devido a diversidade de modelos de movimento de placas tectônicas, o vetor deslocamento poderá ter diferentes valores de intensidades e direções/sentidos e portanto, estudos relacionados com o emprego desses modelos e a escolha destes que proporcionam menores discrepâncias posicionais (tendências) são necessários.

No posicionamento RTK-NTRIP em uma região limítrofe da Argentina com Uruguai Camisay et al. (2013) utilizaram a estação UYSO (Uruguai) como referência na determinação da estação CAÑAS (Frey Bentos – Uruguai). Empregaram coordenadas nos referenciais ROU98 (Uruguai), POSGAR2007 (Argentina) e solução semanal

¹ <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>

SIRGAS1741 (IGb08). Foi realizado o pós-processamento dos dados com o software comercial Leica Geo Office gerando o vetor linha de base UYSO-CAÑAS com três grupos diferentes de coordenadas para a estação de controle (nos três sistemas de referência) obtendo-se três conjuntos de coordenadas para a estação CAÑAS nos três referenciais. Verificaram que os servidores “NTRIP Caster” transmitem correções no sistema de referência oficial de cada País (RAMSAC-NTRIP (Rede Argentina de Monitoreo Satelital Continuo) (POSGAR2007, época 2006,6); REGNA-ROU (Red Geodésica Nacional Activa de la República Oriental del *Uruguay*) (ROU98, época 1995,4); RBMC-IP (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – *Internet Protocol*) (SIRGAS2000, época 2000,4). Observaram que a utilização de um ou outro referencial nas coordenadas da estação de controle (*server*) influencia na acurácia das coordenadas finais da estação de interesse. O modelo VEMOS2009 foi empregado para determinação das velocidades da estação UYSO e atualização de suas coordenadas para a época dos sistemas empregados e, desse modo, verificaram que a maior parte das discrepâncias encontradas são devido à desatualização das coordenadas. A diferença de época de 18 anos para o caso de ROU98 e 7 anos para POSGAR2007 pode introduzir erros posicionais de dezenas de centímetros evidenciando a falta de acurácia do método quando se empregam coordenadas desatualizadas das estações NTRIP *Server*.

No Brasil, por sua particular situação na placa tectônica Sul-Americana (SOAM), os resultados de posicionamento relativo ou posicionamento diferencial são pouco sensíveis à época do levantamento (GT2, 2003). E de acordo com Stanaway e Roberts (2009), as placas tectônicas são internamente rígidas e estáveis longe de suas bordas (limites). As linhas de base medidas entre duas estações geodésicas localizadas em uma placa rígida podem variar alguns milímetros por ano. Por outro lado, em zonas próximas a borda de placa e em regiões de deformação difusa, as alterações nas linhas de base tornam-se significantes e variáveis dependendo do regime de tensão que prevalece na zona de deformação (STANAWAY; ROBERTS, 2009).

A disponibilidade gratuita de observações GNSS das redes RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo) na Argentina e RBMC no Brasil possibilitou a realização de experimentos nestes dois países. Como no Brasil emprega-se para determinação posicional o sistema de referência SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e na Argentina o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632), torna-se necessário compatibilizar os sistemas geodésicos de referência na estimação das coordenadas das estações nesses dois países. Embora a maioria das estações dessas redes rastreiem

observações dos sistemas GPS e GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), optou-se pela realização dos processamentos no programa Leica Geo Office (LGO) empregando-se apenas observações GPS. Vale salientar, também, que foram realizados experimentos na Argentina de modo a verificar a influência dos modelos de velocidade no posicionamento por GPS em uma região diferente do Brasil, localizada na placa SOAM e não muito distante de zonas de deformação (bordas de placas).

No contexto apresentado, é evidente a necessidade do emprego de modelos para determinação das velocidades das estações para que se considere o movimento da placa tectônica nos posicionamentos absolutos e relativos e a compatibilização de referenciais geodésicos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar as implicações do emprego de diferentes modelos de movimento para a placa Sul-Americana e de parâmetros da transformação de Helmert para compatibilização do referencial e época no posicionamento geodésico por GPS.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Empregar diferentes modelos geodésicos e geofísicos de movimento para a placa Sul-Americana para atualização das coordenadas de interesse;
- b. Estimar 14 parâmetros da transformação de Helmert para mudança de referencial das coordenadas e velocidades do ITRF2008 (IGb08) para SIRGAS2000 (ITRF2000);
- c. Estimar as coordenadas do polo de Euler e vetor velocidade angular para placa Sul-Americana com base nas velocidades da solução SIR11P01 no ITRF2008 de algumas estações da rede RBMC/SIRGAS-CON;
- d. Realizar comparação da transformação das coordenadas com os parâmetros do IBGE-PPP, IERS (Altamimi et al. (2007), Petit e Luzum (2010) e Altamimi, Collilieux e Métivier (2011)) e PT_Carvalho e a atualização das coordenadas com 19 modelos de velocidades em uma região no Brasil;

- e. Aplicar os parâmetros da transformação de Helmert disponibilizados pelo IERS (Petiti e Luzum (2010), Altamimi, Collilieux e Métivier (2011)) e 19 modelos de movimento para a placa SOAM para compatibilização de sistemas de referência e época no posicionamento por GPS em duas áreas localizadas no Brasil e na Argentina;
- f. Comparar as coordenadas das estações de interesse obtidas no transporte de coordenadas e no posicionamento em rede em uma região no Brasil e na Argentina com e sem o emprego de 19 modelos de movimento para a placa SOAM e os parâmetros de transformação fornecidos pelos IERS; e
- g. Desenvolver um aplicativo computacional em ambiente MATLAB para automatizar o cálculo das velocidades das estações com base em diferentes modelos de movimento para a placa Sul-Americana, para que se realize a mudança de referencial das velocidades e coordenadas entre diferentes sistemas de referência e atualize as coordenadas.

1.1.3 Justificativa

O posicionamento preciso por GPS é realizado com base nas observáveis da fase da portadora e pseudodistância e nas efemérides transmitidas ou precisas. As efemérides transmitidas, desde a semana GPS 1762 estão referenciadas à realização WGS84 (*World Geodetic System*) denominada de WGS84 (G1762), a qual é alinhada ao ITRF2008 (IGb08) e implementada pelo segmento de controle operacional do GPS em 16/10/2013 (NGA, 2014). As efemérides precisas GPS são dadas atualmente (10/11/2015) no sistema IGb08, o qual é alinhado ao ITRF2008 (IGS, 2015). Como já mencionado, no Brasil emprega-se o SIRGAS2000 (época 2000,4) e na Argentina o POSGAR07 (época 2006,632), os quais são compatíveis, respectivamente, com o ITRF2000 e ITRF2005. Portanto, torna-se necessário a compatibilização de referencial e época das estações de controle empregadas com as efemérides precisas ou transmitidas.

A placa tectônica Sul-Americana, onde o território brasileiro está situado, se desloca a uma velocidade aproximada de 1,2 cm/ano na direção noroeste (DA SILVA; COSTA; VAZ, 2010). Costa, Santos e Gemael (2003) determinaram o campo de velocidade para a placa tectônica Sul-Americana usando dados GPS coletados pelas estações da RBMC e de algumas da rede IGS na América do Sul e concluíram que os vetores velocidades das estações da RBMC têm uma magnitude média de 2 cm/ano. Liberal (2015), considerando 107 vértices da rede continental SIRGAS2000 calculou com

emprego do modelo de movimento de placa MORVEL2010 o valor médio para o vetor velocidade de 8,95 mm/ano para essa placa. Calculou também as diferenças dos valores (médios) das velocidades obtidas com os modelos APKIM2005-DGFI, APKIM2005-IGN; ITRF2000 PMM, NUVEL1A, VEMOS2009 em relação ao MORVEL2010 e encontrou, respectivamente, valores iguais a: 1,27 mm/ano; 2,46 mm/ano; 2,55 mm/ano; 1,85 mm/ano e 5,60 mm/ano.

No posicionamento com o GPS efetuado no Brasil na época 2015,5, por exemplo, as coordenadas das estações base no Brasil deverão ser atualizadas da época 2000,4 para a época 2015,5, ou seja, deve-se considerar o deslocamento da estação em um intervalo de 15,1 anos. Na Argentina, as coordenadas deverão ser atualizadas da época 2006,632 para a época 2015,5, ou seja, 8,869 anos. Portanto, se a diferença da magnitude do vetor velocidade entre os modelos for de 1mm/ano, considera-se um deslocamento posicional de 15 mm no Brasil e 9 mm na Argentina.

De modo semelhante, caso sejam empregadas as coordenadas semanais das estações de controle obtidas da rede SIRGAS-CON e efemérides precisas no posicionamento relativo, as coordenadas das estações de interesse determinadas no mesmo referencial e época das efemérides precisas deverão ser transformadas e atualizadas para os referenciais oficiais em cada país.

Portanto, é importante a realização de experimentos que possibilitem a verificação do impacto do emprego de diferentes modelos de velocidade para a placa SOAM e parâmetros de transformação na mudança de referencial e atualização das coordenadas das estações no posicionamento por GPS.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas Geodésicos de Referência

O ITRS é um sistema de referência espacial tridimensional, geocêntrico, que gira com a Terra em seu movimento diurno no espaço. A escala e as direções estão especificadas pela Resolução n° 2 da IUGG adotada na XX Assembleia Geral em 1991. Nesse sistema, os pontos fixos à crosta da Terra, sofrem pequenas variações com o tempo, devido aos efeitos geofísicos, como por exemplo as deformações tectônicas ou das marés (VASCONCELLOS, 2003; PETIT; LUZUM, 2010).

O ITRS é definido como sendo um sistema no qual (BLITZKOW; MATOS, 2007; PETIT; LUZUM, 2010; ITRF, 2015):

- Origem: centro de massa da Terra (geocêntrico) incluindo os oceanos e atmosfera;

- Escala: a unidade de comprimento é o metro (SI – Sistema Internacional);

- Orientação: definida pelo BIH (*Bureau International de l' Heure*) em 1984,0;

A evolução temporal da orientação é assegurada pela condição de “não rotação residual da rede” (NNR, *No-Net-Rotation*) em relação aos movimentos tectônicos sobre toda a Terra.

Na definição do ITRS, o eixo Z tem sentido para o IRP – *IERS Reference Pole*, o eixo X aponta para a direção do IRM – *IERS Reference Meridian*, e o eixo Y torna o sistema dextrogiro (PETIT, LUZUM, 2010).

A realização inicial do ITRS foi denominada de ITRF88 e a mais recente é denominada de ITRF2008 (PETIT, LUZUM, 2010). A previsão era de que em agosto de 2014, a nova realização do ITRS, denominada de ITRF2013, fosse disponibilizada para a comunidade usuária, mas isso não ocorreu (ITRF, 2015).

As coordenadas ITRF são obtidas pela combinação das soluções TRF individuais calculadas pelos centros de análises IERS com o emprego de observações provenientes de técnicas geodésicas espaciais, tais como o GNSS, *Very-Long-Baseline Interferometry* (VLBI), *Satellite Laser Ranging* (SLR), *Lunar Laser Ranging* (LLR) e *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS) (ITRF, 2015).

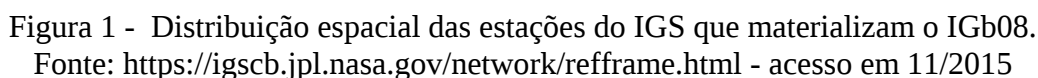
ITRF2008 é a realização ITRS pelo IERS mais atual e emprega dados de séries temporais das posições das estações e parâmetros de orientação da Terra (*EOP – Earth Orientation Parameters*) disponibilizados pelos centros responsáveis pelo processamento das observáveis de quatro técnicas geodésicas espaciais (GNSS, VLBI, SLR, DORIS). O ITRF2008 é composto por coordenadas e velocidades de 934 estações localizadas em 580 localidades distribuídas globalmente, sendo 463 no Hemisfério Norte e 117 no Hemisfério Sul (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2011).

Na realização do ITRF2008, a origem foi realizada de modo que, na época 2005,0, os parâmetros de translação e suas variações temporais fossem nulas em relação à série temporal do SLR do ILRS (*International Laser Ranging Service*) (ITRF, 2015).

O IGS é um serviço fornecido por uma colaboração voluntária de mais de 200 instituições distribuídas pelo mundo, com objetivo de proporcionar produtos de alta qualidade como: efemérides precisas (GPS e GLONASS), correções dos relógios dos

O IGS utiliza sua própria realização (ITRF) baseada apenas em observações GNSS, a qual é totalmente consistente com a realização ITRS do IERS (ALTAMIMI, 2003). A partir de 07/10/2012, semana GPS 1709, até o presente, a realização ITRF do IGS é denominada de IGb08 e é alinhada ao ITRF2008 (REBISCHUNG, 2011, 2012)

A Figura 1 ilustra a distribuição espacial das estações que materializam a rede IGS mais recente (IGb08).



O SIRGAS é um sistema de referência definido de forma idêntica ao ITRS e sua realização é uma densificação regional do ITRF (IBGE, 2005; SÁNCHEZ et al., 2013). As coordenadas do SIRGAS estão associadas a uma época de referência e sua variação temporal é levada em consideração pelas velocidades de cada estação.

13

na segunda realização do SIRGAS, denominada de SIRGAS2000, onde foram utilizados dados de 184 estações GPS e corresponde a densificação ITRF2000 (SÁNCHEZ et al., 2013). A época de referência das coordenadas é da realização SIRGAS2000 é 2000,4.

A terceira realização do SIRGAS é a rede de operação contínua SIRGAS (SIRGAS-CON). Atualmente, esta rede é composta por cerca de 400 estações GPS de operação contínua. Destas estações, 59 pertencem a rede global do IGS (SÁNCHEZ et al., 2013; SIRGAS, 2015). As coordenadas das estações da rede SIRGAS-CON são calculadas semanalmente pelos centros de combinação e processamento SIRGAS. As coordenadas finais e velocidades das estações SIRGAS-CON são disponibilizadas para os usuários pelo IGS-RNAAC-SIR (*IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS*) que atua no DGFI (SIRGAS, 2015).

As coordenadas semanais das estações da rede SIRGAS-CON estão referenciadas ao referencial das efemérides precisas IGS e na época (quarta-feira às 12h) da semana escolhida. Já, as coordenadas provenientes da solução multianual (obtida com base na solução de vários anos) refere-se ao ITRF mais atual e uma época específica de referência, como exemplo, tem-se a solução SIR11P011 que é referida ao ITRF2008, época 2005,0.

Na Argentina, a rede POSGAR07 está composta por 178 estações que foram obtidas de medições de 36 horas e processadas com o software científico GAMIT-GBLOK. E, estas estações em conjunto com 45 ativas da rede RAMSAC compõem a rede geodésica de primeira ordem na Argentina (IGN, 2015). As coordenadas das estações geodésicas na Argentina deverão ser referenciadas ao POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) (SIRGAS,2015; IGN, 2015).

A seção 2.2 apresenta os modelos matemáticos empregados na mudança de referencial das coordenadas e velocidades entre realizações de diferentes sistemas de referência.

2.2 Relacionamento entre Sistemas de Referência

A transformação de Helmert é utilizada para relacionar dois sistemas de referência com base no emprego de 14 parâmetros de transformação, sendo três translações, três rotações horárias, um fator de escala e respectivas variações temporais (PETIT, LUZUM, 2010).

A Figura 2 ilustra a geometria da transformação entre dois sistemas de referência e os parâmetros envolvidos. As variações temporais dos parâmetros e a escala não foram representadas.

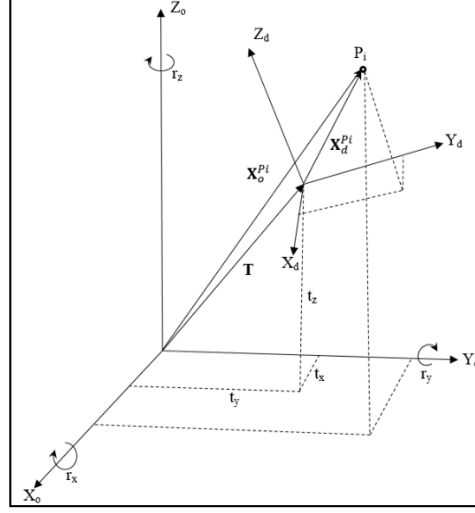


Figura 2 - Geometria da mudança de referencial do sistema de referência origem (o) para o sistema destino (d).

O modelo matemático (1) empregado na mudança de referencial é resultado de uma transformação passiva, em sistemas dextrogiros, com rotações horárias positivas e pode ser encontrado em Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008) e Petit e Luzum (2010).

$$\vec{X}_d = \vec{T} + \lambda \cdot \mathbf{R} \cdot \vec{X}_o \quad (1)$$

Sendo:

$\vec{X}_d$: vetor posição no referencial destino; $\vec{X}_o$: vetor posição no referencial origem; $\vec{T}$: vetor de translação, i.e., coordenadas da origem do sistema destino no sistema origem; λ : é a escala; e $\mathbf{R}$: matriz de rotação.

Os parâmetros de transformação são fornecidos ou calculados em uma época (t_k) e para empregá-los na equação (1) é necessário atualizá-los para a época (t_0) das coordenadas no referencial de origem. Desse modo, as coordenadas no sistema de referência destino estarão também na época (t_0).

As matrizes de rotações diferenciais em torno dos eixos X, Y, Z são iguais, respectivamente, a 2, 3 e 4.

$$\mathbf{R}(X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r_x) & -\sin(r_x) \\ 0 & \sin(r_x) & \cos(r_x) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$R(Y) = \begin{bmatrix} \cos(r_y) & 0 & \sin(r_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(r_y) & 0 & \cos(r_y) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$R(Z) = \begin{bmatrix} \cos(r_z) & -\sin(r_z) & 0 \\ \sin(r_z) & \cos(r_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Os ângulos de rotação são considerados pequenos e portanto, tem-se que:

$$\cos(r_x)=1, \cos(r_y)=1, \cos(r_z)=1; \sin(r_x)=r_x \text{ (rad)}, \sin(r_y)=r_y \text{ (rad)}, \sin(r_z)=r_z \text{ (rad)}.$$

A matriz de rotação R resultante do produto das matrizes de rotações diferenciais (R(X), R(Y), R(Z)) em torno dos eixos X, Y, Z é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -r_z & r_y \\ r_z & 1 & -r_x \\ -r_y & r_x & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sendo:

r_x, r_y, r_z : rotações diferenciais horárias (positivas).

A escala entre os dois sistemas de referência é aproximadamente igual a unidade e é dada por:

$$\lambda = D+1 \quad (6)$$

Sendo:

D: fator diferença de escala.

Se os sistemas de coordenadas (origem e destino) possuem o mesmo padrão linear, a diferença de escala deverá ser nula e a escala igual à unidade (LUGNANI, 1987; COSTA, 2003).

A matriz R dada em (5) pode ser reescrita como:

$$R + I = \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Substituindo (6) e (7) em (1) tem-se:

$$\vec{X}_d = \vec{T} + (D+1) \cdot (R+I) \cdot \vec{X}_0 \quad (8)$$

$$\vec{X}_d = \vec{T} + D \cdot R \cdot \vec{X}_0 + D \cdot I \cdot \vec{X}_0 + R \cdot \vec{X}_0 + I \cdot \vec{X}_0 \quad (9)$$

Sendo:

I: matriz identidade.

Os elementos da matriz rotação R e D têm ordem de grandeza de 1×10^{-5} e, portanto, o produto $D \cdot R$ pode ser considerado igual a zero. E, desse modo, a equação (9) toma a forma (ITRF, 2015):

$$\vec{X}_d = \vec{T} + \vec{X}_0 + D \cdot \vec{X}_0 + R \cdot \vec{X}_0 \quad (10)$$

A equação (10) é linear para um conjunto de coordenadas obtidas por técnicas geodésicas espaciais (PETIT, LUZUM, 2010).

A equação (10) na forma matricial é dada por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + D \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o \quad (11)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -r_z & r_y \\ r_z & D & -r_x \\ -r_y & r_x & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o \quad (12)$$

A equação (12) é encontrada no site do ITRF² e em (PETIT, LUZUM, 2010).

As coordenadas das estações e os parâmetros da transformação de Helmert são dados em função do tempo. Portanto, derivando a equação (10) em relação ao tempo (t), tem-se (PETIT, LUZUM, 2010):

$$\dot{\vec{X}}_d = \dot{\vec{X}}_0 + \dot{\vec{T}} + \dot{D} \cdot \vec{X}_0 + D \cdot \dot{\vec{X}}_0 + \dot{R} \cdot \vec{X}_0 + R \cdot \dot{\vec{X}}_0 \quad (13)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} + \dot{D} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o + D \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} 0 & -\dot{r}_z & \dot{r}_y \\ \dot{r}_z & 0 & \dot{r}_x \\ -\dot{r}_y & \dot{r}_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}_o \quad (14)$$

Os elementos da matriz rotação R e D têm ordem de magnitude de 10^{-5} e $\dot{\vec{X}}_0$ está em torno de 10 cm por ano, os termos $D \cdot \dot{\vec{X}}_0$ e $R \cdot \dot{\vec{X}}_0$ são desprezíveis, pois representam cerca de zero milímetro em mais de 100 anos (PETIT; LUZUM, 2010; ITRF, 2015). Desse modo, reescrevendo a equação (13) e (14), tem-se:

² http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt

$$\dot{\vec{X}}_d = \dot{\vec{X}}_o + \dot{\vec{T}} + \dot{\vec{D}} \cdot \vec{X}_o + \dot{\vec{R}} \cdot \vec{X}_o \quad (15)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} + \dot{\vec{D}} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} 0 & -\dot{r}_z & \dot{r}_y \\ \dot{r}_z & 0 & \dot{r}_x \\ -\dot{r}_y & -\dot{r}_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o \quad (16)$$

Sendo:

$\dot{\vec{X}}_d$: vetor velocidade do ponto de interesse no sistema destino; $\dot{\vec{X}}_o$: vetor velocidade do ponto de interesse no sistema origem; e $\dot{\vec{T}}$, $\dot{\vec{D}}$, $\dot{\vec{R}}$: são as variações temporais dos parâmetros da transformação.

Fazendo $\dot{\vec{X}}_d = \vec{V}_d$, $\dot{\vec{X}}_o = \vec{V}_o$ em (16), tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} + \dot{\vec{D}} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} 0 & -\dot{r}_z & \dot{r}_y \\ \dot{r}_z & 0 & \dot{r}_x \\ -\dot{r}_y & \dot{r}_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o \quad (17)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{r}_z & \dot{r}_y \\ \dot{r}_z & \dot{D} & -\dot{r}_x \\ -\dot{r}_y & \dot{r}_x & \dot{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o \quad (18)$$

Sendo:

$[V_x, V_y, V_z]_o^T$: vetor das velocidades cartesianas geocêntricas no sistema de referência origem;

$[V_x, V_y, V_z]_d^T$: vetor das velocidades cartesianas geocêntricas no sistema de referência destino.

2.3 Parâmetros de transformação para mudança de referencial das coordenadas e velocidades

Os parâmetros da transformação de Helmert entre algumas realizações do ITRS podem ser obtidos no site³, os quais são transcritos nas Tabelas 1, 2 e 3 ou Altamimi et al. (2007), Petiti e Luzum (2010) e Altamimi, Collilieux e Métivier (2012). Os parâmetros para mudança de referencial das coordenadas das estações do ITRF (IGb08) para o

³ http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt

SIRGAS2000 determinados pelo IBGE e empregados no serviço IBGE-PPP podem ser obtidos no site⁴ e IBGE (2013) e visualizados na Tabela 1.

Na Tabela 1 estão disponíveis os parâmetros de transformação e respectivas variações temporais para mudança do ITRF2008 para os ITRF2005, ITRF2000 e ITRF97 e do ITRF (IGb08) para o SIRGAS2000.

Tabela 1 - Parâmetros de transformação e suas respectivas variações temporais.

Parâmetros (unidades)	t_x (m)	t_y (m)	t_z (m)	D (ppb)	r_x (mas)	r_y (mas)	r_z (mas)	Época
Variações temporais (unidades)	$\dot{t}_x$ (m/ano)	$\dot{t}_y$ (m/ano)	$\dot{t}_z$ (m/ano)	$\dot{D}$ (ppb/ano)	$\dot{r}_x$ (mas/ano)	$\dot{r}_y$ (mas/ano)	$\dot{r}_z$ (mas/ano)	
ITRF2008 → ITRF2005	-0,002	-0,0009	-0,0047	0,94	0,0000	0,0000	0,0000	2000,0
	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
ITRF2008 → ITRF2000	-0,0019	-0,0017	-0,0105	1,34	0,0000	0,0000	0,0000	2000,0
	0,0001	0,0001	-0,0018	0,08	0,0000	0,0000	0,0000	
ITRF2008 → ITRF97	0,0048	0,0026	-0,0332	2,92	0,0000	0,0000	0,06	2000,0
	0,0001	-0,0005	-0,0032	0,09	0,0000	0,0000	0,02	
ITRF (IGb08) → SIRGAS2000	0,002	0,0041	0,0039	-1,000	0,170	-0,030	0,070	-
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Fonte: Petit e Luzum (2010); IBGE (2013).

Nas Tabelas 2 e 3 estão disponíveis os 14 parâmetros e respectivas precisões para transformação do ITRF2008 para ITRF2005 e do ITRF2005 para ITRF2000.

Tabela 2 - Parâmetros da transformação do ITRF2008 para ITRF2005 – época 2005,0 e respectivas precisões.

Parâmetros (unidades)	t_x (m)	t_y (m)	t_z (m)	D (ppb)	r_x (mas)	r_y (mas)	r_z (mas)
	-0,0005	-0,0009	-0,0047	0,94	0,000	0,000	0,000
±	0,0002	0,0002	0,0002	0,03	0,008	0,008	0,008
Variações temporais (unidades)	$\dot{t}_x$ (m/ano)	$\dot{t}_y$ (m/ano)	$\dot{t}_z$ (m/ano)	$\dot{D}$ (ppb/ano)	$\dot{r}_x$ (mas/ano)	$\dot{r}_y$ (mas/ano)	$\dot{r}_z$ (mas/ano)
	0,0003	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000
±	0,0002	0,0002	0,0002	0,03	0,008	0,008	0,008

Fonte: Altamimi, Collilieux e Métivier (2011).

Com base nas variações temporais presentes na Tabela 2 e da equação (18) nota-se que na transformação de referencial das velocidades do ITRF2008 para ITRF2005, apenas a velocidade (v_x) se modifica, pois, com exceção da variação temporal da translação ($\dot{t}_x$), todas as demais são iguais a zero.

⁴ <http://igs.bkg.bund.de/ntrip/orbits#Transformations>

Tabela 3 - Parâmetros de transformação do ITRF2005 para ITRF2000 - época 2000,0.

Parâmetros (unidades)	t_x (m)	t_y (m)	t_z (m)	D (ppb)	r_x (mas)	r_y (mas)	r_z (mas)
	0,0001	-0,0008	-0,0058	0,40	0,000	0,000	0,000
$\pm$	0,0003	0,0003	0,0003	0,05	0,012	0,012	0,012
Variações temporais (unidades)	$\dot{t}_x$ (m/ano)	$\dot{t}_y$ (m/ano)	$\dot{t}_z$ (m/ano)	$\dot{D}$ (ppb/ano)	$\dot{r}_x$ (mas/ano)	$\dot{r}_y$ (mas/ano)	$\dot{r}_z$ (mas/ano)
	-0,0002	0,0001	-0,0018	0,08	0,000	0,000	0,000
$\pm$	0,0003	0,0003	0,0003	0,05	0,012	0,012	0,012

Fonte: Altamimi et al. (2007).

Os parâmetros de transformação entre os sistemas ITRF2005 e ITRF2000 foram estimados com base em 70 estações que estão espacialmente distribuídas conforme Figura 3 (ITRF, 2015).

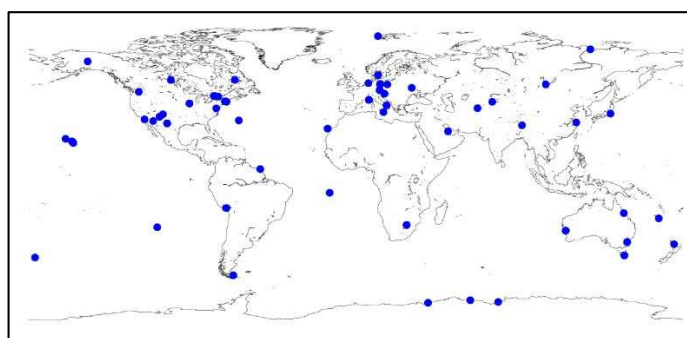


Figura 3 - Estações empregados na estimativa dos parâmetros de transformação de ITRF2005 para ITRF2000.

Fonte: ITRF (2015).

Os parâmetros de transformação entre ITRF2008 e ITRF2005 foram estimados utilizando 171 estações distribuídas conforme Figura 4. Essas estações podem ser encontradas na página⁵.

⁵ http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/core_network_ITRF2008.txt.

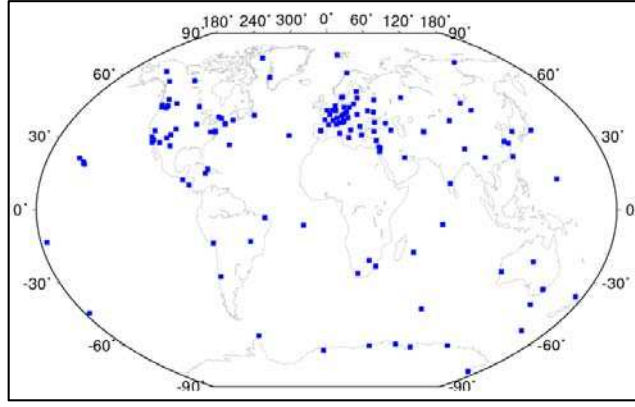


Figura 4 - Estações empregadas na determinação dos parâmetros de transformação do ITRF2008 para o ITRF2005.

Fonte: ITRF (2015).

Os parâmetros são determinados em uma época (t_k) e deverão ser atualizados para a época (t_0) das coordenadas no sistema origem antes de serem empregados nas equações (11) ou (12). Essa atualização é realizada com base nas variações temporais dos parâmetros de transformação e no intervalo de tempo entre as épocas (t_k) e (t_0). A equação empregada nessa atualização é encontrada em (PETIT; LUZUM, 2010; ITRF, 2015) e é dada por:

$$\vec{P}(t_0) = \vec{P}(t_k) + \dot{\vec{P}} \cdot \Delta t \quad (19)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} t_x(t_0) \\ t_y(t_0) \\ t_z(t_0) \\ D(t_0) \\ r_x(t_0) \\ r_y(t_0) \\ r_z(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x(t_k) \\ t_y(t_k) \\ t_z(t_k) \\ D(t_k) \\ r_x(t_k) \\ r_y(t_k) \\ r_z(t_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \\ \dot{D} \\ \dot{r}_x \\ \dot{r}_y \\ \dot{r}_z \end{bmatrix} \cdot (t_0 - t_k) \quad (20)$$

Sendo:

$$\vec{P}(t_0) = [t_x(t_0) \quad t_y(t_0) \quad t_z(t_0) \quad D(t_0) \quad r_x(t_0) \quad r_y(t_0) \quad r_z(t_0)]^T;$$

$$\vec{P}(t_k) = [t_x(t_k) \quad t_y(t_k) \quad t_z(t_k) \quad D(t_k) \quad r_x(t_k) \quad r_y(t_k) \quad r_z(t_k)]^T;$$

$$\dot{\vec{P}} = [\dot{t}_x \quad \dot{t}_y \quad \dot{t}_z \quad \dot{D} \quad \dot{r}_x \quad \dot{r}_y \quad \dot{r}_z]^T; \text{ e } \Delta t = (t_0 - t_k).$$

Onde:

t_0 : época para a qual serão atualizados os parâmetros de transformação e coincidente com a época das coordenadas no sistema origem; t_k : época de referência dos parâmetros;

$\vec{P}(t_0)$: vetor dos parâmetros na época (t_0); $\vec{P}(t_k)$: vetor dos parâmetros na época de referência dos parâmetros; $\dot{\vec{P}}$: vetor das variações temporais dos parâmetros; e Δt : intervalo de tempo decorrido entre as épocas de interesse e dos parâmetros.

As unidades empregadas nas translações e suas variações temporais são, respectivamente, metros e metros por ano; o fator de escala quando dado em ppm (partes por milhão) deverá ser multiplicado por 10^{-6} e por 10^{-9} caso esteja em ppb (partes por bilhão); as rotações diferenciais deverão ser convertidas de milissegundo de arco (0,001") para radianos e, para isto, deve-se dividir o valor em milissegundo de arco por mil e multiplicar por $4,848136811076 \times 10^{-6}$ rad./s; e as épocas de origem e destino deverão estar em anos e suas frações.

2.4 Propagação de variância na atualização dos parâmetros e na mudança de referencial das coordenadas e velocidades.

2.4.1 Propagação de variância na atualização dos parâmetros

Os parâmetros são determinados em uma época específica (t_k) e são disponibilizados, na maioria das vezes, com suas respectivas precisões. Se for necessário atualizá-los para uma época (t_0), deve-se realizar a propagação de variância para estimar as precisões dos parâmetros na época de sua atualização.

O emprego do modelo de propagação covariância dado por Gemael (2004) e aplicado em (19) possibilita a determinação das precisões dos parâmetros atualizados para época (t_0).

$$\Sigma_{P(t_0)} = J \cdot \Sigma_{P(t_k), \dot{P}} \cdot J^T \quad (21)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t_0 - t_k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t_0 - t_k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t_0 - t_k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t_0 - t_k) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t_0 - t_k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t_0 - t_k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t_0 - t_k) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma_{P, \dot{P}} = \text{diag}\{\sigma_{t_x}^2 \quad \sigma_{t_y}^2 \quad \sigma_{t_z}^2 \quad \sigma_D^2 \quad \sigma_{t_x}^2 \quad \sigma_{t_y}^2 \quad \sigma_{t_z}^2 \quad \sigma_{t_x}^2 \quad \sigma_{t_y}^2 \quad \sigma_{t_z}^2 \quad \sigma_D^2 \quad \sigma_{t_x}^2 \quad \sigma_{t_y}^2 \quad \sigma_{t_z}^2\}$$

Onde:

$\Sigma_{p(t_0)}$: MVC dos parâmetros atualizados; J : matriz jacobiana; e $\Sigma_{\tilde{p}(t_k), \dot{\tilde{p}}}$: MVC dos parâmetros na época (t_k) e respectivas variações temporais.

Em $\Sigma_{p, \dot{p}}$ as covariâncias entre os parâmetros e suas variações temporais foram consideradas como sendo iguais à zero.

2.4.2 Propagação de variância na mudança de referencial das coordenadas

As precisões das coordenadas no sistema de referência destino são obtidas pela aplicação da propagação de variância na equação (12) e é dado por (22):

$$\Sigma_{\tilde{x}_d} = J \cdot \Sigma_{\tilde{x}_0, \tilde{p}(t_0)} \cdot J^T \quad (22)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} 1+D & -r_z & r_y & 1 & 0 & 0 & x_0 & 0 & z_0 & -y_0 \\ r_z & 1+D & -r_x & 0 & 1 & 0 & y_0 & -z_0 & 0 & x_0 \\ -r_y & r_x & 1+D & 0 & 0 & 1 & z_0 & y_0 & -x_0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$\Sigma_{\tilde{x}_0, \tilde{p}(t_0)} = \text{diag}\{[\sigma_{x_0}^2 \quad \sigma_{y_0}^2 \quad \sigma_{z_0}^2 \quad \sigma_{t_x}^2 \quad \sigma_{t_y}^2 \quad \sigma_{t_z}^2 \quad \sigma_D^2 \quad \sigma_{r_x}^2 \quad \sigma_{r_y}^2 \quad \sigma_{r_z}^2]\}.$$

Onde:

$\Sigma_{\tilde{x}_d}$: MVC das coordenadas no sistema de referência destino; J : matriz jacobiana; e $\Sigma_{\tilde{x}_0, \tilde{p}(t_0)}$: MVC dos parâmetros e das coordenadas no sistema origem.

A matriz jacobiana é obtida com base na derivada parcial da equação (11) em relação às coordenadas das estações no sistema de referência origem e aos parâmetros de transformação. Vale ressaltar que os valores dos parâmetros e respectivas precisões deverão ser calculadas, se necessário, da época (t_k) para a época (t_0). Desse modo, os valores dos parâmetros e das coordenadas deverão estar na mesma época (t_0).

A MVC dos parâmetros e das coordenadas pode ser diagonal, caso as covariâncias entre os parâmetros e entre as coordenadas no sistema de referência de origem na época t_0 sejam nulas. A MVC ($\Sigma_{x_0, p}$) torna-se diagonal, caso as covariâncias entre os parâmetros e as coordenadas sejam nulas.

As precisões das coordenadas e das translações deverão estar em metros, o fator diferencial de escala é adimensional e as rotações diferenciais em radianos.

2.4.3 Propagação de variância na mudança de referencial das velocidades

As precisões das velocidades no sistema de referência destino são estimadas com base na propagação de variância na transformação entre sistemas de referência das velocidades com base na equação (18) e dado por (23):

$$\Sigma_{Vd} = J \cdot \Sigma_{Xo,Vo,\dot{p}} \cdot J^T \quad (23)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{r}_z & \dot{r}_y & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & x_o & 0 & z_o & -y_o \\ \dot{r}_z & \dot{D} & -\dot{r}_x & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & y_o & -z_o & 0 & x_o \\ -\dot{r}_y & \dot{r}_x & \dot{D} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & z_o & y_o & -x_o & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma_{Xo,V,\dot{p}} = \text{diag}\{[\sigma_{x_o}^2 \quad \sigma_{y_o}^2 \quad \sigma_{z_o}^2 \quad \sigma_{V_{xo}}^2 \quad \sigma_{V_{yo}}^2 \quad \sigma_{V_{zo}}^2 \quad \sigma_{\dot{t}_x}^2 \quad \sigma_{\dot{t}_y}^2 \quad \sigma_{\dot{t}_z}^2 \quad \sigma_{\dot{D}}^2 \quad \sigma_{\dot{t}_x}^2 \quad \sigma_{\dot{t}_y}^2 \quad \sigma_{\dot{t}_z}^2]\}$$

Onde:

Σ_{Vd} : MVC das velocidades no sistema destino; J: matriz jacobiana (derivada da equação 18) em relação às coordenadas no sistema de origem, velocidades cartesianas geocêntricas e variações temporais dos parâmetros; e $\Sigma_{Xo,Vo,\dot{p}}$: MVC formada pelas variâncias das velocidades no sistema de referência origem, das variações temporais dos parâmetros e das coordenadas da estação no sistema origem. Esta MVC é diagonal, pois as covariâncias entre as variáveis foram consideradas iguais à zero.

Na propagação de variância, as precisões das variações temporais das translações deverão estar em metros por ano, o fator diferencial de escala adimensional, as variações das rotações diferenciais em radianos por ano e das coordenadas em metros.

2.5 Cálculo de velocidade das estações com base nas coordenadas do polo de Euler e vetor velocidade angular para uma placa tectônica

Na realização de um sistema de referência, se não forem estimadas as velocidades das estações e deseja-se atualizar as coordenadas de uma época para outra, faz-se o uso de modelos de velocidade das placas tectônicas da região de interesse para calcular as componentes do vetor velocidade da estação (MONICO, 2008).

O movimento de uma placa tectônica pode ser explicado em função de aspectos geofísicos, geológicos, geodésicos ou uma combinação deles, gerando diferentes modelos da tectônica de placas (SOTO, 2006).

Os modelos de movimentos de placas tectônicas fornecem as coordenadas latitude e longitude do polo de Euler e a velocidade angular da placa a partir dos quais se obtêm as componentes do vetor velocidade angular (STEIN; WYSESSION, 2003; HAASDYK; JANSSEN, 2011; FRANCO, MORENO, 2006).

O movimento de uma determinada placa tectônica na superfície terrestre pode ser descrito pelo vetor de Euler (vetor geocêntrico de rotação), onde o movimento é efetuado ao redor de um eixo de rotação que passa no centro da Terra. A interseção desse eixo com a superfície da Terra é chamada de polo de Euler ou polo de rotação (GREINER, 1999; PEREZ, 2002)

Na Figura 5, observa-se o polo de Euler (P_E) de coordenadas (Φ, Λ) e um ponto (P_i) localizado em uma placa tectônica que se deslocou até o ponto (P'_i) com a norma do vetor velocidade angular ($\|\vec{\Omega}\|$) em relação ao eixo de rotação que contém o polo de Euler (SOUZA; GARNÉS, 2014).

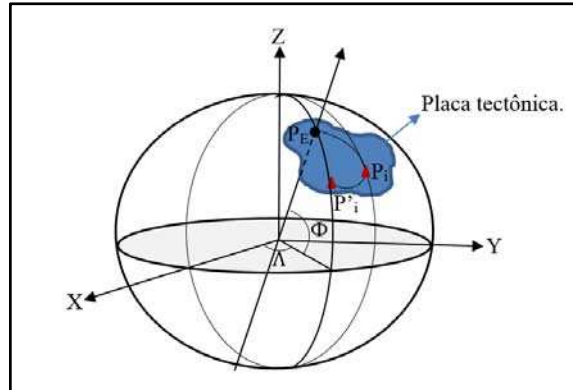


Figura 5 - Polo de Euler (P_E) na esfera.
Fonte: Adaptado de Souza e Garnés (2014).

As velocidades angulares em torno dos eixos (x, y, z) são iguais a (STEIN; WYSESSION, 2003; FRANCO; MORENO, 2006; SOTO, 2006; STANAWAY; ROBERTS, 2011):

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \|\vec{\Omega}\| \cdot \begin{bmatrix} \cos \Phi \cdot \cos \Lambda \\ \cos \Phi \cdot \sin \Lambda \\ \sin \Phi \end{bmatrix} \quad (24)$$

Sendo:

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$: componentes da velocidade angular da placa dada em radianos por anos;
 Φ, Λ : latitude e longitudes do polo de Euler, em graus decimais; e $\|\vec{\Omega}\|$: norma da velocidade angular da placa, em radianos por ano.

O vetor velocidade tangencial ($\vec{V}$) de uma estação de posição (P_i) localizada sobre uma placa tectônica que movimenta em torno do polo de Euler é dada por (STEIN; WYSESSION, 2003):

$$\vec{V} = \vec{\Omega} \times \vec{X} \quad (25)$$

Onde:

$\vec{V}$: vetor velocidade tangencial da estação; $\vec{\Omega}$: vetor velocidade angular da placa P_i ; e $\vec{X}$: vetor posição de uma estação localizada na placa P .

A velocidade angular é constante em todos os pontos da placa, mas a velocidade linear de um dado ponto na placa varia dependendo de sua posição em relação ao eixo que contém o polo de Euler (POMEROL et al., 2013). Estes autores, ressaltam que a velocidade linear é máxima no equador de Euler e decresce em relação aos polos de Euler, onde é nula.

Desenvolvendo o produto vetorial da equação (25) tem-se que o vetor velocidade linear de um dado ponto é dado por:

$$\vec{V} = (\omega_y \cdot z - \omega_z \cdot y) \vec{i} + (\omega_z \cdot x - \omega_x \cdot z) \vec{j} + (\omega_x \cdot y - \omega_y \cdot x) \vec{k} \quad (26)$$

$$\vec{V} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \quad (27)$$

Desse modo, as componentes do vetor velocidade são dadas por:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_y \cdot z - \omega_z \cdot y \\ \omega_z \cdot x - \omega_x \cdot z \\ \omega_x \cdot y - \omega_y \cdot x \end{bmatrix} \quad (28)$$

Reescrevendo a equação (28), tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (29)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (30)$$

As velocidades calculadas representam o movimento linear na escala de tempo não geológico, porém a estação geodésica poderá estar sujeita a complexos movimentos tectônicos ou deformações locais não detectadas por esses modelos (HAASDYK; JANSSEN, 2011).

As velocidades cartesianas no Sistema Topocêntrico Local (STL) das estações de interesse podem ser calculadas diretamente com base em suas coordenadas geográficas e das componentes cartesianas da velocidade angular da placa tectônica.

A posição de um ponto (Pi) na esfera em termos de coordenadas cartesianas é obtido a partir das coordenadas esféricas e do raio da Terra. Portanto, as coordenadas cartesianas são dadas por:

$$\begin{aligned}x &= R_T \cdot \cos \Phi \cdot \cos \Lambda \\y &= R_T \cdot \cos \Phi \cdot \sin \Lambda \\z &= R_T \cdot \sin \Phi\end{aligned}\tag{31}$$

Substituindo x, y, z de (31) em (30) tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = R_T \begin{bmatrix} 0 & \sin \Phi & -\cos \Phi \cdot \sin \Lambda \\ -\sin \Phi & 0 & \cos \Phi \cdot \cos \Lambda \\ \cos \Phi \cdot \sin \Lambda & -\cos \Phi \cdot \cos \Lambda & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}\tag{32}$$

As velocidades cartesianas no STL são obtidas por (CALAIS, 2008):

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi \cdot \cos \Lambda & -\sin \Phi \cdot \sin \Lambda & \cos \Phi \\ -\sin \Lambda & \cos \Lambda & 0 \\ \cos \Phi \cdot \cos \Lambda & \cos \Phi \cdot \sin \Lambda & \sin \Phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}\tag{33}$$

Substituindo (32) em (33) e realizando a multiplicação matricial e simplificação, tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_u \end{bmatrix} = R_T \begin{bmatrix} -\sin \Lambda & -\cos \Lambda & 0 \\ -\cos \Lambda \cdot \sin \Phi & -\sin \Phi \cdot \sin \Lambda & \cos \Phi \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}\tag{34}$$

A componente u na equação (34) do vetor velocidade é igual a zero. De acordo com Goudarzi, Cocard e Saterre (2014), esse fato confirma que a rotação em torno do polo de Euler na superfície da esfera não afeta a componente altimétrica. Portanto, o modelo matemático (34) pode ser escrito como (GOUDARZI; COCARD; SATERRE, 2014):

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \end{bmatrix} = R_T \begin{bmatrix} \sin\Lambda & -\cos\Lambda & 0 \\ -\sin\Phi \cdot \cos\Lambda & -\sin\Phi \cdot \sin\Lambda & \cos\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (35)$$

Onde:

V_n, V_e : velocidades cartesianas no STL; (Φ, Λ) : coordenadas do polo de Euler; e R_T : raio da Terra adotado (6.371.000 m).

O modelo matemático (35) possibilita o cálculo das velocidades da estação no STL, com base nas coordenadas esféricas do ponto de interesse e das velocidades angulares da placa SOAM.

2.6 Atualização das coordenadas cartesianas geocêntricas

A atualização das coordenadas dadas em uma época (t_0) para uma época destino (t) é realizada com base no conhecimento das velocidades dessa estação e no intervalo de tempo entre as épocas de origem e destino e é realizada com base na equação (36).

$$\vec{X}(t) = \vec{X}(t_0) + \vec{V} \cdot \Delta t \quad (36)$$

Sendo:

$$\Delta t = (t - t_0); \vec{X}(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]^T; \vec{X}(t_0) = [x(t_0) \ y(t_0) \ z(t_0)]^T; e$$

$$\vec{V} = [v_x \ v_y \ v_z]^T.$$

Onde:

$\vec{X}(t)$: vetor das coordenadas cartesianas geocêntricas atualizadas para a época de destino;

$\vec{X}(t_0)$: vetor das coordenadas cartesianas geocêntricas na época de origem; $\vec{V}$: vetor das componentes cartesianas geocêntricas do vetor velocidade da estação; e Δt : intervalo de tempo entre às épocas de origem e destino.

2.6.1 Propagação de variância na determinação das velocidades e na atualização de coordenadas

A partir das coordenadas do polo de Euler, da velocidade angular e de seus respectivos desvios padrão e covariâncias quando existir, pode-se estimar as precisões das componentes da velocidade angular da placa tectônica. Aplicando-se a lei de propagação de variância em (24), tem-se que:

$$\Sigma_{\omega_x, \omega_y, \omega_z} = J \cdot \Sigma_{\Phi, \Lambda, \Omega} \cdot J^T \quad (37)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} -\Omega \cdot \cos \Lambda \cdot \sin \Phi & -\Omega \cdot \cos \Phi \cdot \sin \Lambda & \cos \Phi \cdot \cos \Lambda \\ -\Omega \cdot \sin \Phi \cdot \sin \Lambda & \Omega \cdot \cos \Phi \cdot \cos \Lambda & \cos \Phi \cdot \sin \Lambda \\ \Omega \cdot \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \end{bmatrix};$$

$$\Sigma_{\Phi, \Lambda, \Omega} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Phi}^2 & \sigma_{\Phi\Lambda} & \sigma_{\Phi\Omega} \\ \sigma_{\Lambda\Phi} & \sigma_{\Lambda}^2 & \sigma_{\Lambda\Omega} \\ \sigma_{\Omega\Phi} & \sigma_{\Omega\Lambda} & \sigma_{\Omega}^2 \end{bmatrix}_{3 \times 3}; \text{ e } \Sigma_{\Omega} = \begin{bmatrix} \sigma_{\omega_x}^2 & \sigma_{\omega_x\omega_y} & \sigma_{\omega_x\omega_z} \\ \sigma_{\omega_y\omega_x} & \sigma_{\omega_y}^2 & \sigma_{\omega_y\omega_z} \\ \sigma_{\omega_z\omega_x} & \sigma_{\omega_z\omega_y} & \sigma_{\omega_z}^2 \end{bmatrix}.$$

Onde:

J: matriz jacobiana (derivadas parciais de (36) em relação às coordenadas do polo de Euler e velocidade angular da placa); $\Sigma_{\Phi, \Lambda, \Omega}$: MVC das coordenadas do polo de rotação e da velocidade angular da placa; Σ_{Ω} : MVC das velocidades angulares em torno dos eixos cartesianos.

A MVC (Σ_{Ω}) é obtida do processo de ajustamento por mínimos quadrados na estimação das componentes do vetor velocidade angular. O procedimento para determinação da (Σ_{Ω}) é descrito na seção 3.2.5.

Com base no conhecimento da MVC das componentes da velocidade angular e das coordenadas do polo de Euler é possível calcular a MVC das velocidades cartesianas geocêntricas. Cabe ressaltar que se pode ou não considerar as precisões das coordenadas na determinação da MVC das velocidades cartesianas geocêntricas. Foram apresentados os dois modos. Da equação (28), tem-se:

$$\begin{aligned} v_x &= \omega_y \cdot z(t_0) - \omega_z \cdot y(t_0) \\ v_y &= \omega_z \cdot x(t_0) - \omega_x \cdot z(t_0) \\ v_z &= \omega_x \cdot y(t_0) - \omega_y \cdot x(t_0) \end{aligned} \quad (38)$$

A velocidades cartesianas geocêntricas em (38) são obtidas em função das coordenadas cartesianas das estações e das componentes da velocidade angular da placa e, portanto, aplicando-se a lei de propagação de variância em (38), considerando as coordenadas das estações como variáveis, obtém-se a MVC dessas velocidades. Portanto, tem-se:

$$\Sigma_{\bar{v}} = J \cdot \Sigma_{\bar{x}(t_0), \bar{\Omega}} \cdot J^T \quad (39)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y & 0 & z & -y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x & -z & 0 & x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & y & -x & 0 \end{bmatrix}; \Sigma_{\vec{V}} = \begin{bmatrix} \sigma_{v_x}^2 & \sigma_{v_x v_y} & \sigma_{v_x v_z} \\ \sigma_{v_y v_x} & \sigma_{v_y}^2 & \sigma_{v_y v_z} \\ \sigma_{v_z v_x} & \sigma_{v_z v_y} & \sigma_{v_z}^2 \end{bmatrix}; e$$

$$\Sigma_{\vec{X}(t_0), \vec{\Omega}} = \begin{bmatrix} \sigma_{x(t_0)}^2 & \sigma_{x(t_0)y(t_0)} & \sigma_{x(t_0)z(t_0)} & & & \\ \sigma_{y(t_0)x(t_0)} & \sigma_{y(t_0)}^2 & \sigma_{y(t_0)z(t_0)} & & & \\ \sigma_{z(t_0)x(t_0)} & \sigma_{z(t_0)y(t_0)} & \sigma_{z(t_0)}^2 & & & \\ & & & [0]_{3 \times 3} & & \\ & & & & \sigma_{\omega_x}^2 & \sigma_{\omega_x \omega_y} & \sigma_{\omega_x \omega_z} \\ & & & & \sigma_{\omega_y \omega_x} & \sigma_{\omega_y}^2 & \sigma_{\omega_y \omega_z} \\ & & & & \sigma_{\omega_z \omega_x} & \sigma_{\omega_z \omega_y} & \sigma_{\omega_z}^2 \end{bmatrix}_{6 \times 6}.$$

Onde:

$\Sigma_{\vec{V}}$: MVC das velocidades cartesianas geocêntricas; J : matriz jacobiana (matriz das derivadas parciais das equações em (39) em relação às coordenadas cartesianas e às componentes do vetor velocidade angular da placa); $\Sigma_{\vec{X}(t_0), \vec{\Omega}}$: MVC das coordenadas cartesianas e das componentes da velocidade angular da placa.

Uma segunda opção é desconsiderar as precisões das coordenadas cartesianas geocêntricas na determinação da MVC das velocidades cartesianas. Desse modo, a equação (39) se reduz a (40):

$$\Sigma_{\vec{V}} = J \cdot \Sigma_{\vec{\Omega}} \cdot J^T \quad (40)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{bmatrix}; \Sigma_{\vec{\Omega}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\omega_x}^2 & \sigma_{\omega_x \omega_y} & \sigma_{\omega_x \omega_z} \\ \sigma_{\omega_y \omega_x} & \sigma_{\omega_y}^2 & \sigma_{\omega_y \omega_z} \\ \sigma_{\omega_z \omega_x} & \sigma_{\omega_z \omega_y} & \sigma_{\omega_z}^2 \end{bmatrix}; \Sigma_{\vec{V}} = \begin{bmatrix} \sigma_{v_x}^2 & \sigma_{v_x v_y} & \sigma_{v_x v_z} \\ \sigma_{v_y v_x} & \sigma_{v_y}^2 & \sigma_{v_y v_z} \\ \sigma_{v_z v_x} & \sigma_{v_z v_y} & \sigma_{v_z}^2 \end{bmatrix}.$$

Onde:

J : derivada das equações em (38) em relação às componentes cartesianas da velocidade angular da placa; $\Sigma_{\vec{\Omega}}$: MVC das componentes da velocidade angular da placa.

No procedimento de atualização das coordenadas, as precisões das velocidades cartesianas das estações podem ser conhecidas, o que torna desnecessário aplicar a propagação de variância para esse fim. A partir da MVC das velocidades cartesianas das estações ou componentes da velocidade angular da placa e com base na equação (40) escrita nas formas (41) e (42), calcula-se a MVC das coordenadas atualizadas da época de origem para uma época destino.

$$\begin{aligned}
x(t) &= x(t_0) + \omega_y \cdot z(t_0) \cdot \Delta t - \omega_z \cdot y(t_0) \cdot \Delta t \\
y(t) &= y(t_0) + \omega_z \cdot x(t_0) \cdot \Delta t - \omega_x \cdot z(t_0) \cdot \Delta t \\
z(t) &= z(t_0) + \omega_x \cdot y(t_0) \cdot \Delta t - \omega_y \cdot x(t_0) \cdot \Delta t
\end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
x(t) &= x(t_0) + v_x \cdot \Delta t \\
y(t) &= y(t_0) + v_y \cdot \Delta t \\
z(t) &= z(t_0) + v_z \cdot \Delta t
\end{aligned} \tag{42}$$

O modelo de propagação de variância considerando as equações em (41) é dado por:

$$\Sigma_{\bar{x}(t)} = J \cdot \Sigma_{\bar{x}(t_0), \bar{\Omega}} \cdot J^T \tag{42}$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & -\omega_z \cdot \Delta t & \omega_y \cdot \Delta t & 0 & z(t_0) \cdot \Delta t & -y(t_0) \cdot \Delta t \\ \omega_z \cdot \Delta t & 1 & -\omega_x \cdot \Delta t & -z(t_0) \cdot \Delta t & 0 & x(t_0) \cdot \Delta t \\ -\omega_y \cdot \Delta t & \omega_x \cdot \Delta t & 1 & y(t_0) \cdot \Delta t & -x(t_0) \cdot \Delta t & 0 \end{bmatrix}$$

Onde:

$\Sigma_{\bar{x}(t)}$: MVC das coordenadas na época destino; J: matriz das derivadas parciais das equações em (41) em relação às coordenadas na época (t_0) e às componentes da velocidade angular da placa.

O modelo de propagação de variância considerando a equação (42) é dado por:

$$\Sigma_{\bar{x}(t)} = J \cdot \Sigma_{\bar{x}(t_0), \bar{V}} \cdot J^T \tag{43}$$

Sendo:

$$\begin{aligned}
J &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix}; \\
\Sigma_{\bar{x}(t_0), \bar{V}} &= \begin{bmatrix} \sigma_{x(t_0)}^2 & \sigma_{x(t_0)y(t_0)} & \sigma_{x(t_0)z(t_0)} & & & \\ \sigma_{y(t_0)x(t_0)} & \sigma_{y(t_0)}^2 & \sigma_{y(t_0)z(t_0)} & & & \\ \sigma_{z(t_0)x(t_0)} & \sigma_{z(t_0)y(t_0)} & \sigma_{z(t_0)}^2 & & & \\ & & & [0]_{3 \times 3} & & \\ & & & & \sigma_{v_x}^2 & \sigma_{v_x v_y} & \sigma_{v_x v_z} \\ & & & & \sigma_{v_y v_x} & \sigma_{v_y}^2 & \sigma_{v_y v_z} \\ & & & & \sigma_{v_z v_x} & \sigma_{v_z v_y} & \sigma_{v_z}^2 \end{bmatrix}_{6 \times 6}
\end{aligned}$$

Onde:

$\Sigma_{\tilde{x}(t_0), \tilde{v}}$: MVC constituída pelas variâncias das coordenadas na época (t_0) e das velocidades cartesianas da estação; J : matriz jacobiana formada pelas derivadas das equações em (42) em relação às coordenadas na época (t_0) e das velocidades cartesianas.

2.7 Propagação de variância das coordenadas cartesianas para geodésicas

As precisões das coordenadas geodésicas podem ser calculadas via propagação de variância com base no conhecimento da MVC das coordenadas cartesianas geocêntricas e das coordenadas geodésicas (THOMSON; KRAKIWSKY; STEEVES, 1977). O modelo matemático de propagação de covariância das coordenadas cartesianas para geodésicas é dado por:

$$\Sigma_{\lambda, \varphi, h} = J \cdot \Sigma_{x, y, z} \cdot J^T \quad (44)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{-\text{sen}\lambda}{(N+h) \cdot \cos\varphi} & \frac{\cos\lambda}{(N+h) \cdot \cos\varphi} & 0 \\ \frac{-\text{sen}\varphi \cdot \cos\lambda}{(M+h)} & \frac{-\text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\lambda}{(M+h)} & \frac{\cos\varphi}{(M+h)} \\ \cos\varphi \cdot \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \text{sen}\lambda & \text{sen}\varphi \end{bmatrix};$$

$$\Sigma_x = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{x,y} & \sigma_{x,z} \\ \sigma_{y,x} & \sigma_y^2 & \sigma_{y,z} \\ \sigma_{z,x} & \sigma_{z,y} & \sigma_z^2 \end{bmatrix}; M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \cdot \text{sen}^2\varphi)^{\frac{3}{2}}}; N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \cdot \text{sen}^2\varphi}}; e^2 = 2 \cdot f - f^2.$$

Onde:

h : Altitude elipsoidal; φ : Latitude geodésica; λ : Longitude geodésica; e^2 : Quadrado da primeira excentricidade do elipsoide; N : Raio de curvatura da seção primeiro vertical; M : Raio de curvatura da seção meridiana do elipsoide de referência; e $\Sigma_{x, y, z}$: MVC das coordenadas cartesianas geocêntricas.

A variância da altitude elipsoidal em (44) está em m^2 e da longitude e da latitude estão em rad^2 e para convertê-las em m^2 deve-se multiplicá-las, respectivamente, por $[(N+h) \cdot \cos\varphi]^2$ e $(M+h)^2$ (LEICK, 2004).

2.8 Calculo de velocidades, azimutes e propagação de variância no Sistema Geodésico Local (SGL)

As componentes do vetor velocidade no SGL poderão ser calculadas com base nas coordenadas geodésicas latitude e longitude e das velocidades cartesianas geocêntricas de cada estação. O modelo matemático é dado por:

$$\vec{V}_{n,e,u} = R \cdot \vec{V}_{x,y,z} \quad (45)$$

Sendo:

$$R = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_{Pi} \cdot \cos\lambda_{Pi} & -\sin\varphi_{Pi} \cdot \sin\lambda_{Pi} & \cos\varphi_{Pi} \\ -\sin\lambda_{Pi} & \cos\lambda_{Pi} & 0 \\ \cos\varphi_{Pi} \cdot \cos\lambda_{Pi} & \cos\varphi_{Pi} \cdot \sin\lambda_{Pi} & \sin\varphi_{Pi} \end{bmatrix};$$

$$V_{n,e,u} = [n \ e \ u]^T; V_{x,y,z} = [x \ y \ z]^T.$$

Onde:

φ_{Pi} : latitude geodésica do ponto Pi; λ_{Pi} : longitude geodésica do ponto Pi; R : matriz de rotação; $\vec{V}_{n,e,u}$: vetor velocidade do ponto Pi no SGL; $\vec{V}_{x,y,z}$: vetor velocidade do ponto Pi no sistema cartesiana geocêntrico.

A equação (45) pode ser escrita na forma:

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_u \end{bmatrix}_{Pi} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi \cdot \cos\lambda & -\sin\varphi \cdot \sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi \cdot \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{Pi} \quad (46)$$

As precisões das velocidades cartesianas no SGL foram realizadas com base na propagação de variância das velocidades cartesianas geocêntricas para geodésicas locais. Assim, tem-se:

$$\Sigma_{\vec{V}_{n,e,u}} = J \cdot \Sigma_{\vec{V}_{x,y,z}} \cdot J^T \quad (47)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} -\cos\lambda \cdot \sin\varphi & -\sin\varphi \cdot \sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi \cdot \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}; \Sigma_V = \begin{bmatrix} \sigma_{v_x}^2 & \sigma_{v_x v_y} & \sigma_{v_x v_z} \\ \sigma_{v_y v_x} & \sigma_{v_y}^2 & \sigma_{v_y v_z} \\ \sigma_{v_z v_x} & \sigma_{v_z v_y} & \sigma_{v_z}^2 \end{bmatrix};$$

$$\Sigma_{n,e,u} = \begin{bmatrix} \sigma_{v_n}^2 & \sigma_{v_n v_e} & \sigma_{v_n v_u} \\ \sigma_{v_e v_n} & \sigma_{v_e}^2 & \sigma_{v_e v_u} \\ \sigma_{v_u v_n} & \sigma_{v_u v_e} & \sigma_{v_u}^2 \end{bmatrix}_{3 \times 3}.$$

Onde:

J: matriz das derivadas das equações em (46) em relação às velocidades cartesianas geocêntricas; Σ_{v_x, v_y, v_z} : MVC das velocidades cartesianas geocêntricas; $\Sigma_{v_{n,e,u}}$: MVC das velocidades cartesianas no SGL.

A magnitude (norma) do vetor velocidade calculado com base nas coordenadas cartesianas no SGL é igual a:

$$\|\vec{V}\| = \sqrt{v_e^2 + v_n^2} \quad (48)$$

A direção (Azimute - AZ) do vetor velocidade pode ser calculado com base nas componentes do vetor velocidade no SGL é igual a:

$$AZ = \arctg\left(\frac{v_e}{v_n}\right) \quad (49)$$

No cálculo do Az, com base na equação (49), é necessário realizar análise de quadrante.

As velocidades cartesianas geocêntricas podem ser calculadas com base no conhecimento das coordenadas latitude e longitude geodésicas do ponto de interesse e respectivas velocidades para latitude e longitude, dados pela expressão (50):

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\phi \cdot \cos\lambda & -\sin\phi \cdot \sin\lambda & \cos\phi \\ \cos\phi \cdot \cos\lambda & \cos\phi \cdot \sin\lambda & \sin\phi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_\lambda \\ v_\phi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

Onde:

v_λ : velocidade para componente longitude em metros por ano; v_ϕ : velocidade para a componente latitude em metros por ano.

2.9 Modelos de velocidades para a placa Sul-Americana (SOAM)

Os modelos de movimento para as placas tectônicas antes da disponibilização de series temporais de coordenadas obtidas por meio de técnicas da geodesia espacial, eram confeccionados com dados geofísicos e/ou geológicos (ALTAMIMI; MÉTIVIER; COLLILIEUX, 2012). Portanto, o vetor velocidade para um dado ponto, em uma determinada placa, pode ser obtido a partir de medições ao longo do tempo (séries temporais) ou calculado com base em modelos de movimentos de placas (geológicos-geofísicos e geodésicos) que fornecem os vetores de Euler.

Neste trabalho foram implementados e empregados 19 modelos de velocidade para placa SOAM para a determinação das velocidades das estações, a saber: ITRF2000-

PMM (ITRF2000 *Plate Motion Model*), ITRF2005-PMM, ITRF2008-PMM, APKIM2005D, APKIM2008D, NNR-MORVEL56, Costa, Santos e Gemaël (2003), Perez, Monico e Chaves (2003), Souza e Garnés (2014), Souza (2013), MV_Carvalho, Grade_VEMOS2009, VEMOS 2014, GSRM_2.1, GEODVEL2010 (NNR), SOPAC 2004, REVEL2000, NNR-NUVEL-1A e PB2002.

2.9.1 ITRF2000-PMM, ITRF2005-PMM e ITRF2008-PMM

No modelo de movimento ITRF2000-PMM, o polo de Euler foi determinado para seis placas tectônicas com base nas velocidades da realização ITRF2000 (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002). Velocidades de 51 estações localizadas em seis placas foram consideradas na estimação das coordenadas do polo de Euler e da velocidade angular de cada placa (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002). Cabe ressaltar que estes autores utilizaram no processo de estimação dos parâmetros a MVC completa, extraída do arquivo SINEX ITRF2000.

No ITRF2005 - PMM, para estimar o polo de Euler de 15 placas tectônicas consistentes com a realização ITRF2005 foi empregado seu campo de velocidade constituído de 152 estações (ALTAMIMI et al., 2007). As estações selecionadas estão localizadas em porções estáveis das placas tectônicas e distantes de zonas de deformação. Possuem observações ininterruptas de no mínimo três anos e resíduos das velocidades menores que 1,5 mm/ano (ALTAMIMI et al., 2007). Segundo estes autores, esse modelo de movimento de placa tectônica melhora a solução fornecida no ITRF2000 que envolve seis placas tectônicas.

A MVC das velocidades das 152 estações foram extraídas do arquivo SINEX ITRF2005 e empregadas na estimação das componentes do vetor de Euler (ALTAMIMI et al., 2007). Na estimação do polo de Euler, estão presentes oito estações na América do Sul, as quais são denominadas de: Rio Grande (DORIS e GPS), Córdoba (GPS), La Plata (GPS), Kourou (DORIS e GPS), Brasília (GPS), Cachoeira Paulista (DORIS e GPS), Fortaleza (VLBI e GPS), Ascension (DORIS e GPS) (ALTAMIMI et al., 2007).

A Figura 6 ilustra os vetores velocidades das estações empregados na estimação das velocidades angulares das placas tectônicas.

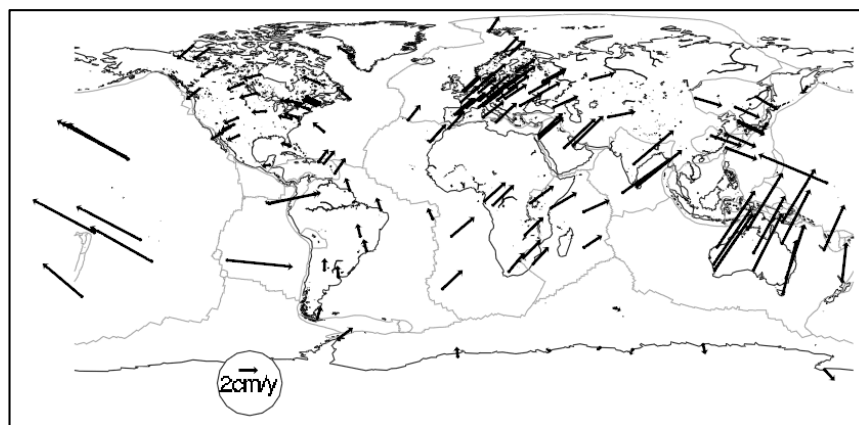


Figura 6 - Vetores velocidades das estações utilizadas na estimação dos vetores de Euler.

Fonte: Altamimi et al. (2007).

O ITRF2005 possui cinco anos de dados a mais do que o ITRF2000 e por isso, os vetores de Euler das seis placas (as mesmas do ITRF2000) são melhores determinados com o campo de velocidade do ITRF2005 (ALTAMIMI et al., 2007).

O campo de velocidade do ITRF2008 demonstrou ter melhor qualidade e ser mais preciso do que as soluções ITRF anteriores (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2012). A partir das velocidades de 206 estações geodésicas afastadas das bordas das placas, de zonas de deformação e de regiões de ajuste glacial isostático (GIA, do inglês *Glacial Isostatic Adjustment*) foram estimadas de modo simultâneo as velocidades angulares de 14 placas tectônicas e *Origem Rate Bias* (ORB) (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2012). O modelo de movimento de placa ITRF2008-PMM é derivado e consistente com o ITRF2008 e os RMS ponderados obtidos do ajuste global são iguais a 0,33 e 0,31 mm/ano para as componente leste e norte, respectivamente (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2012).

Na América do Sul foram empregados dados de dez estações na estimação no polo Euler e da velocidade angular da placa. As estações e dados provenientes das técnicas geodésicas espaciais são: Buenos Aires (GPS), La Plata (GPS), Port Stanley (GPS), Kourou (DORIS e GPS), Presidente Prudente (GPS), Curitiba (GPS), Cananeia (GPS), Brasília (GPS), Fortaleza (GPS e VLBI) e Ascension (GPS e DORIS) (ALTAMIMI; MÉTIVIER; COLLILIEUX, 2012). Vale ressaltar que todas as velocidades angulares das placas foram obtidas simultaneamente.

Segundo Altamimi, Métivier e Collilieux (2012), pode-se estimar as velocidades angulares das placas individualmente ou de forma global (de todas as placas simultaneamente) e empregando a inversa da MVC completa ou os termos da diagonal como peso. Na estimação simultânea das velocidades angulares das 14 placas e do ORB

no modelo ITRF2008-PMMM foi utilizada a matriz MVC completa de modo que as precisões fossem mais realistas (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2012).

A velocidade de uma estação em uma determinada placa com base nos dados do modelo ITRF2008 é dada por (ALTAMIMI; MÉTIVIER; COLLILIEUX, 2012):

$$\vec{V}_i = \vec{\Omega}_p \cdot \vec{X}_i + \dot{\vec{T}} \quad (51)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{t}_{x_v} \\ \dot{t}_{y_v} \\ \dot{t}_{z_v} \end{bmatrix} \quad (52)$$

Sendo:

$\vec{V}_i$: vetor das componentes do vetor velocidade; $\vec{\Omega}_p$: é o vetor de Euler; $\vec{X}_i$: vetor posição do ponto i na placa p; e $\dot{\vec{T}}$: variação da origem do referencial. Vale ressaltar que as componentes do vetor ($\dot{\vec{T}}$) não fazem parte dos parâmetros da transformação de Helmert.

O ITRF2008-PMM se mostrou mais concordante com o NNR-MORVEL56 do que com o NNR-NUVEL 1A para todas as placas, com exceção da Australiana onde foi observado uma variação média na rotação residual de 4 mm/ano (ALTAMINI; MÉTIVIER; COLLILIEUX, 2012).

A Figura 7 ilustra as 206 estações (em verde) empregadas na estimação das velocidades angulares das 14 placas tectônicas e do ORB, as quais constituem o modelo ITRF2008-PMM.

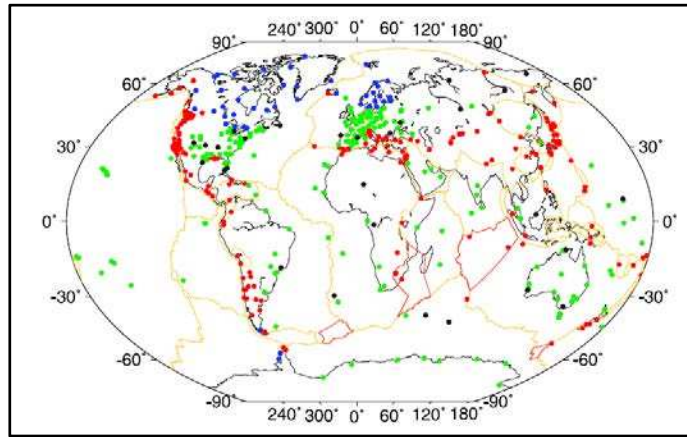


Figura 7 - Estações próximas a limites de placas, zonas de deformação e áreas de ajuste glacial isostático.

Fonte: Altamimi, Métivier e Collilieux (2012).

Estão presentes nessa figura estações ITRF2008 com cobertura de dados de mais de três anos. Em vermelho são as estações próximas a limites de placas ou zonas de

deformação. Em azul, estações localizadas em áreas de GIA. Em preto são as estações com velocidades residuais normalizadas maiores que 3, ou resíduos maiores que 3 mm/ano. Os limites de placas estabelecidas no modelo Bird (2003) estão apresentados em laranja, e quatro placas adicionais do modelo MORVEL estão em vermelho (ALTAMIMI; MÉTIVIER; COLLILIEUX, 2012).

A Figura 8 ilustra as velocidades horizontais do ITRF2008 com desvios padrão menores que 0,2 mm/ano.

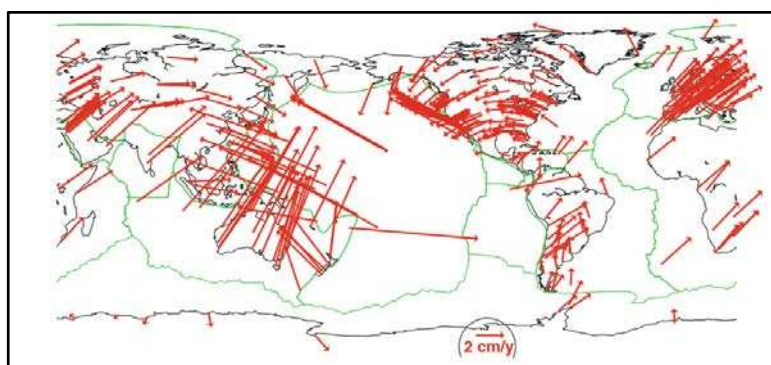


Figura 8 - Velocidades horizontais no ITRF2008.
Fonte: Altamimi, Métivier e Collilieux (2011).

As coordenadas do polo de Euler e as velocidades angulares para a placa SOAM são apresentados nas Tabelas 4 e 5 após breve descrição dos modelos de velocidades baseados nas soluções ITRF2000, ITRF2005 e ITRF2008.

Na Tabela 4, encontram-se as coordenadas do polo de Euler e a velocidade angular para a placa SOAM.

Tabela 4 - Polo de Euler e velocidade angular da placa SOAM.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
¹ ITRF2000 PMM	-21,457±2,806	-134,631±4,762	0,113 ± 0,005
² ITRF2005 PMM	-16,800±1,593	-129,631±2,051	0,121 ± 0,003

Sendo: °: Grau; Ma:Milhões de anos.

Fonte: ¹Altamimi, Sillard e Boucher (2002); ²Altamimi et al. (2007).

As componentes cartesianas do vetor velocidade angular da placa SOAM apresentados na Tabela 5 foram calculadas com base na equação (24) e no uso das coordenadas do polo de Euler e das velocidades angulares da placa para os modelos ITRF2000 PMM e ITRF2005 PMM disponíveis na Tabela 4. Essas componentes, para o modelo ITRF2008 PMM, dadas em Altamimi, Collilieux e Métivier (2012) estão em miliarcossegundo por ano (mas/ano) e foram convertidas para radianos por milhões de anos (rad/Ma).

Na Tabela 5 encontram-se as componentes cartesianas do vetor de Euler para a placa SOAM.

Tabela 5 - Componentes cartesianas da velocidade angular.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
¹ ITRF2000	-0,0012895	-0,0013062	-0,0007214
² ITRF2005	-0,0012895	-0,0015571	-0,0006104
³ ITRF2008	-0,0011781	-0,0015078	-0,0007466

Fonte: Adaptado de ¹Altamimi, Sillard e Boucher (2002) e ²Altamimi et al. (2007); Altamimi, Métivier e Collilieux (2012).

Na Tabela 6 estão as variações das componentes do ORB estimadas em conjunto com as velocidades das 14 placas tectônicas no modelo de velocidade ITRF2008.

Tabela 6 - Variações da origem do referencial.

Estações nas Placas		Parâmetros		
EURA	NOAM	$\dot{t}_{x_v}$ (mm/ano)	$\dot{t}_{y_v}$ (mm/ano)	$\dot{t}_{z_v}$ (mm/ano)
69	44	0,41±0,27	0,22±0,32	0,41±0,30

Fonte: Altamimi, Métivier e Collilieux (2012).

Onde: EURA: *Eurasian Plate*; NOAM (*North American Plate*); $\dot{t}_{x_v}$, $\dot{t}_{y_v}$, $\dot{t}_{z_v}$: componentes da variação da origem do referencial.

Na seção 2.9.2 são apresentados os modelo de movimento da placa SOAM calculados pelo *Scripps Orbit and Permanent Array Center* (SOPAC) e por Prawirodirdjo e Bock (2004).

2.9.2 SOPAC *Plate Motion Model* (SOPAC PMM)

Prawirodirdjo e Bock (2004) estimaram modelo de movimento de 17 maiores e menores placas tectônicas com base na análise das séries temporais de 106 estações GPS distribuídas no globo terrestre. Os dados empregados foram coletados de janeiro de 1991 a julho de 2003. Para estimação dos parâmetros de movimento da placa SOAM foram empregadas séries temporais de 5 estações GPS (ASC1 (7,2 anos), BRAZ (8,2 anos), FORT (10,2 anos), KOUR (10,7 anos) e LPGS (8,1 anos)) e são relacionados ao ITRF2000 (PRAWIRODIRDJO; BOCK, 2004)

O SOPAC estima mensalmente as coordenadas do polo de Euler e velocidade angular de 17 placas tectônicas com base nas séries temporais das posições das estações GPS (BOCK et al., 2004). O modelo de movimento de placa é baseado em dados (disponíveis publicamente) de estações GPS e desse modo, esse modelo poderá ser

empregado ou replicado por outros pesquisadores (BOCK et al., 2004; PRAWIRODIRDJO; BOCK, 2004).

A partir das séries temporais diárias das coordenadas das estações e considerando os deslocamentos (*offsets*) e variações sazonais, as velocidades lineares das estações foram estimadas (PRAWIRODIRDJO; BOCK, 2004).

Estações na América do Sul tem mostrado há muito tempo flutuações sazonais e níveis mais elevados de ruídos, resultando em incertezas nas velocidades (PRAWIRODIRDJO; BOCK, 2004). O qui-quadrado calculado para a placa SOAM foi de 0,4 menor do que 1 e pode indicar que as incertezas das velocidades das estações estão superestimadas. Para as placas da América do Norte (22 estações) e Eurásia (18 estações) foram encontrados valores de qui-quadrados iguais, respectivamente, a 1,3 e 1,1 (PRAWIRODIRDJO; BOCK, 2004)

Inclui-se no movimento de placa (rígida) apenas estações cujos resíduos das velocidades sejam menores que a dois desvios padrão das velocidades. Desse modo, pôde-se empregar cerca de 106 estações GPS de 140 (PRAWIRODIRDJO; BOCK, 2004).

A estimação dos polos de Euler foi realizada por minimização das velocidades relativas ao ITRF2000 (BOCK et al., 2004).

Na Figura 9, é possível visualizar as diferenças das normas dos vetores velocidades obtidas com base no modelo SOPAC e ITRF2000 e as elipses dos erros das velocidades com 95% de confiança.

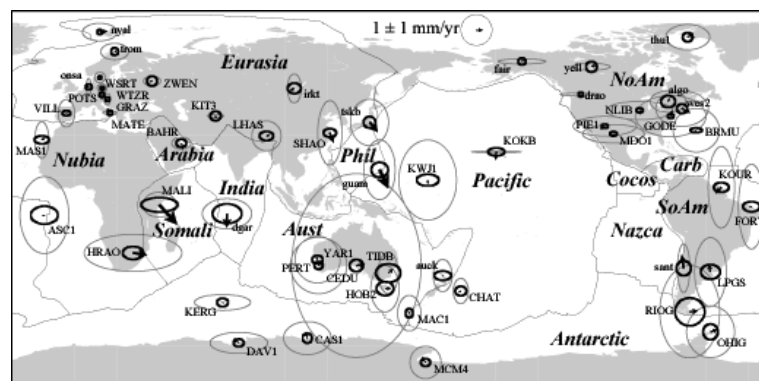


Figura 9 - Comparação das velocidades obtidas com os modelos SOPAC e ITRF2000.
Fonte: BOCK et al. (2004).

Na Tabela 7 encontram-se as coordenadas do polo de Euler e a velocidade angular para a placa SOAM segundo o modelo SOPAC 2004 modelado por Prawirodirdjo e Bock (2004).

Tabela 7- Polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
SOPAC 2004	-21,086	-135,798	$0,108 \pm 0,003$

Fonte: Prawirodirdjo e Bock (2004).

Na Tabela 8 estão disponíveis as componentes do vetor velocidade angular para a placa da placa SOAM com base no modelo SOPAC2004.

Tabela 8 - Componentes da velocidade angular para a placa SOAM.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
SOPAC 2004	-0,0012608	-0,0012262	-0,0006781

Fonte: adaptado de Prawirodirdjo e Bock (2004).

No site SOPAC6 encontram-se as coordenadas do polo de Euler e velocidade angular da placa SOAM estimados com base em cinco estações localizadas na América do Sul (ASC1, BRAZ, FORT, KOUR e LPGS).

Na tabela 9 encontram-se os parâmetros de movimento denominado de SOPAC2005 da placa SOAM estimados (10/01/2005) relativo ao ITRF2000.

Tabela 9 - Polo de Euler e Velocidade angular para a placa SOAM.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
SOPAC 2005	-20,726	-131,655	$0,105 \pm 0,002$

Fonte: ftp://garner.ucsd.edu/pub/docs/pole_rotation/200510.poleRot - acesso 08/2015

Na Tabela 10 estão disponíveis as componentes do vetor velocidade angular para a placa SOAM calculados com base nas coordenadas do polo de Euler e na velocidade angular disponíveis na Tabela 9.

Tabela 10 - Componentes cartesianas da velocidade angular da placa SOAM

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
SOPAC PMM - 2005	-0,0011392	-0,0012806	-0,0006486

Fonte: adaptado de ftp://garner.ucsd.edu/pub/docs/pole_rotation/200510.poleRot - acesso 08/2015

Na seção 2.9.3 são apresentados os modelos da série APKIM calculados com base em dados da geodésia por satélite.

2.9.3 APKIM (*Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model*)

⁶ <http://sopac.ucsd.edu/>

O modelo de movimento de placas tectônicas APKIM é calculado sistematicamente pelo DGFI e usa observações geodésicas espaciais do VLBI, SLR e GPS (Seeber, 2003). O intuito é realizar a cinemática atual de placas com a condição NNR para o ITRF e disponibilizar um novo modelo geodésico para interpretação tectônica (DGFI, 2013).

O modelo geodésico APKIM 8.8 abrange 12 maiores placas tectônicas (placa de COCOS não inclusa) e quatro zonas de deformação (ex. Andes) em limites de placa (DREWES, 1998). Foram empregadas coordenadas e velocidades derivadas do posicionamento com GPS (173 estações e dados de 1993 a 1996), SLR (78 estações e observações compreendidas entre 1979 a 1995) e VLBI (72 estações e dados de 1976 a 1996) (DREWES, 1998).

No APKIM2005, as coordenadas do polo de Euler e velocidades angulares de 17 maiores placas tectônicas e modelagem de cinco zonas de deformações foram estimadas (DREWES, 2009). Os dados de entrada são as coordenadas e velocidades no ITRF2005 das soluções calculadas por dois centros de combinação ITRF (IGN e DGFI) e provenientes de observações realizadas com GPS (1996-2005), SLR (1993-2005), VLBI (1984-2005) e DORIS (1993-2005). Um total de 510 estações em 334 localidades e cobertura de dados de 1984 a 2005 (21 anos). Há duas versões para o APKIM2005, uma calculada pelo DGFI e outra pelo IGN e que de acordo com Drewes (2009) são concordantes (DREWES, 2009).

A versão mais recente do APKIM foi calculada pelo DGFI com uma solução baseada nas velocidades das estações do ITRF2008 calculadas pelo *Institut Géographique National* (IGN) e o DGFI (Referência) e é denominado de APKIM2008D. As velocidades de 577 estações foram introduzidas em um ajustamento para estimar as coordenadas do polo de Euler (Φ, Λ) e velocidades angulares (Ω) de 18 placas tectônicas (rígidas) com modelagem de 6 zonas de deformação, dentre elas o Andes. A estimação dos vetores de rotação da placa foi realizada com abordagem bidimensional de modo a excluir as incertezas das velocidades verticais (*height*) nas soluções da geodésia espacial.

As Figuras 10 e 11 ilustram a cinemática das placas com base nos modelos geodésicos APKIM2005 e APKIM2008D e modelo geológico-geofísico PB2002.

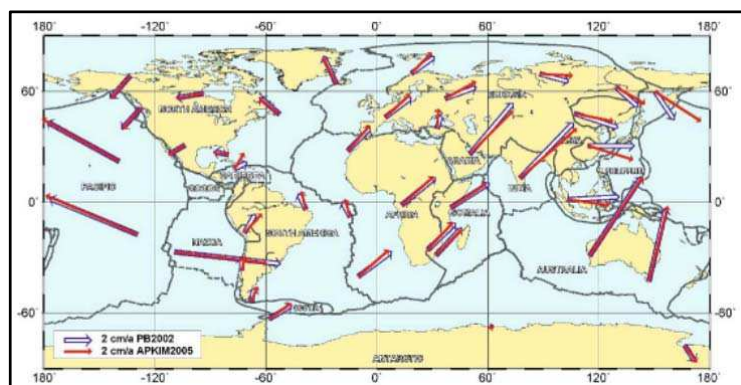


Figura 10 - Vetores velocidades de algumas estações determinados com base nos modelos APKIM2005 e PB2002.

Fonte: Torge e Müller (2012).

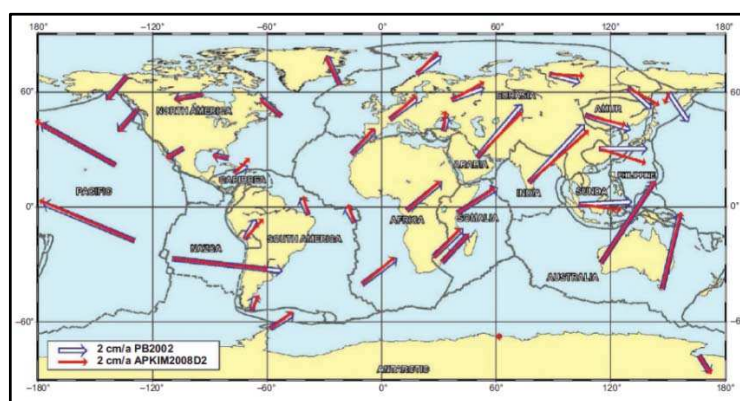


Figura 11 - Vetores velocidades de algumas estações determinados com base nos modelos APKIM2008D e PB2002.

Fonte: Torge e Müller (2012).

Na Tabela 11, estão presentes as coordenadas do polo de Euler e velocidades angulares para placa SOAM segundo os modelos APKIM.

Tabela 11 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
¹ APKIM 8.8	-19,4±5,1	210,1±12,3	0,127±0,010
² APKIM2000	-21,70	230,70	0,0925
³ APKIM2005-DGFI	-17,2±1,1	241,5±2,3	0,115±0,002
⁴ APKIM2005_IGN	-14,6±0,9	238,0±1,5	0,123±0,002
⁵ APKIM2008D	-19,4±1,0	237,8±1,5	0,127±0,002

Fonte: ¹Drewes (1998); ² Drewes e Angermann (2001); ^{3,4} Drewes (2009); ⁵ Drewes e Sánchez (2014).

Na Tabela 12, encontram-se as velocidades angulares para a placa Sul-Americana calculadas com base nas coordenadas do polo de Euler e da velocidade de rotação.

Tabela 12 - Velocidades angulares para a placa Sul-Americana.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
¹ APKIM 8.8	-0,0018088	-0,0010485	-0,0007363
² APKIM2000	-0,0009501	-0,0011608	-0,0005969
³ APKIM2005-DGFI	-0,0009149	-0,0016850	-0,0005935
⁴ APKIM2005_IGN	-0,0011009	-0,0017618	-0,0005411
⁵ APKIM2008D	-0,0011141	-0,0017692	-0,0007363

Fonte: Adaptado de Fonte: ¹Drewes (1998); ² Drewes e Angermann (2001); ^{3,4} Drewes (2009); ⁵ Drewes e Sánchez (2014).

A Figura 12 ilustra as 18 placas tectônicas e zonas de deformação (hachuradas) para o modelo APKIM2005.

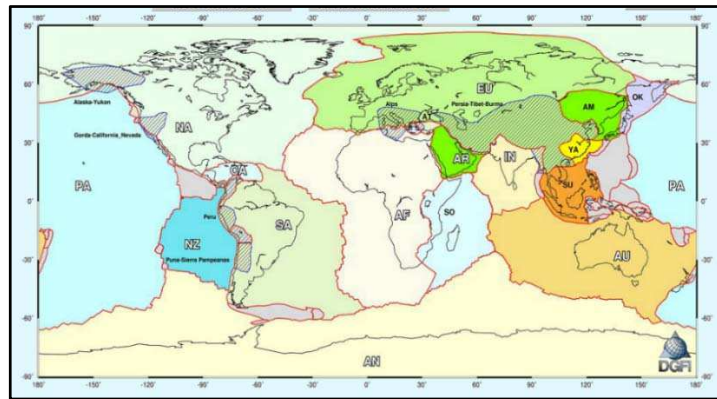


Figura 12 - Placas tectônicas e zonas de deformação segundo o modelo APKIM2005.

Fonte: <http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/>

Na seção 2.9.4 são tratados os modelos NUVEL1 e NUVEL 1A, os quais são amplamente empregados.

2.9.4 Modelo NUVEL (NNR-NUVEL1 e NNR-NUVEL1A)

O modelo global NUVEL1 (*Northern University Velocity Model 1*) descreve o movimento das maiores placas tectônicas (DeMETS et al., 1990). Um total de 1122 dados (277 taxas de espalhamento, 121 azimutes de falhas transformantes, e 724 vetores de terremotos) distribuídos no globo terrestre foram empregados para estimação das coordenadas do polo de Euler e velocidades angulares de 14 maiores placas tectônicas (África, Antártica, Árabia, Austrália, Caribe, Cocos, Eurásia, Índia, Juan de Fuca, Nazca, North America, Pacific, Philippine Sea, South America) (DeMETS et al., 1990; BIRD, 2003).

O NNR-NUVEL1 é o modelo de movimento de placas relativo a um único referencial definido com a condição NNR da litosfera (ARGUS; GORDON, 1991). Com

a revisão da escala de tempo geomagnética calibraram o modelo NUVEL 1, o qual passou a ser denominado de NUVEL1A (DeMets et al., 1994).

De acordo com Drewes e Heidbach (2012), o NNR - NUVEL1A é um modelo de movimento de placas amplamente empregado na realização de referenciais geodésicos, estudos de geodinâmica e efeitos de variação global e não inclui zonas de deformação como os Andes. Segundo McCarthy (1996), as observações do movimento de placas por métodos modernos, técnicas espaciais, são relativamente consistentes com as velocidades médias ao longo dos últimos milhões de anos derivados de gravações geológicas e outras informações geofísicas.

Na Tabela 13 estão presentes as coordenadas do polo de Euler e velocidades angulares da placa SOAM obtidos com os modelos NNR-NUVEL1 e NNR-NUVEL1A.

Tabela 13 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
NNR-NUVEL1	-25,4	-124,6	0,12
NNR-NUVEL1A	-25,325	235,570	0,1164

Fonte: Argus e Gordon (1991); DeMets et al. (1994).

Na Tabela 14 encontram-se os parâmetros de rotação da placa Sul-Americana (SA), coordenadas esféricas do polo de rotação e velocidade angular estimada no modelo de movimento de placas NNR-NUVEL-1A.

Tabela 14 - Componentes do vetor velocidade angular para a placa SOAM.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
¹ NNR-NUVEL 1	-0,0010743	-0,0015573	-0,0008984
² NNR-NUVEL 1A	-0,0010383	-0,0015146	-0,0008690

Fonte: ¹adaptado de Argus e Gordon (1991); De Mets et al. (1994).

A Figura 13 ilustra as placas tectônicas segundo o modelo NUVEL 1.

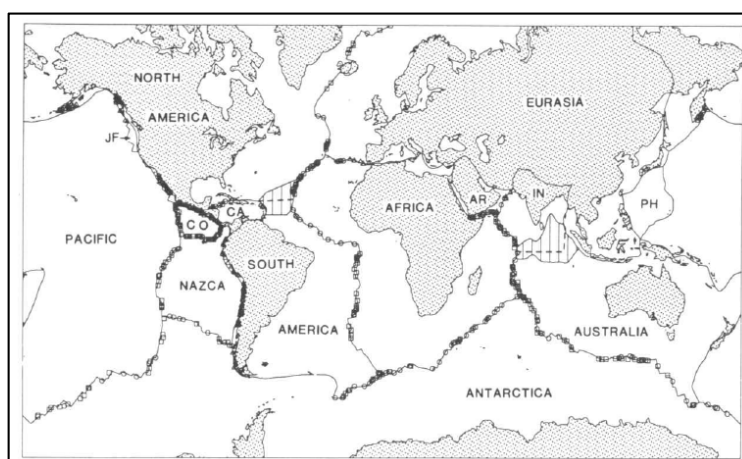


Figura 13 - Placas tectônicas segundo o modelo NUVEL 1.
Fonte: DeMets et al. (1990).

Na Figura 13, pode ser visualizada a localização dos dados (taxas de espalhamento do assoalho oceânico (quadrados), azimutes de falhas transformantes (círculos) e de vetores de deslocamento de sismos (triângulos) empregados na estimação do NUVEL -1.

2.9.5 MORVEL56

O projeto denominado MORVEL plate motion foi iniciado no final dos anos 90 pelos professores Charles DeMets da Universidade Wisconsin-Madison e Richard Gordon da Universidade de Rice University⁷. O MORVEL consiste em um conjunto de velocidades que descreve o movimento de 25 placas tectônicas que, de forma coletiva, cobrem 97,2% da superfície da Terra. Taxas de espalhamento do fundo oceânico e azimutes de falhas foram usadas para determinação do movimento de 19 placas limitadas pelas dorsais meso-oceânicas. Seis placas menores com pouca ou nenhuma conexão com as dorsais meso-oceânicas foram ligadas com o MORVEL com base em velocidades de estações GPS e azimutes de falhas transformantes (DEMETS, GORDON e ARGUS, 2010)

O MORVEL é construído com base em dados provenientes de geofísica, sismologia e emprega mais dados do que o NUVEL-1 e NUVEL-1A para estimativa dos movimentos das placas tectônicas. O MORVEL foi finalizado em 2008, após quase uma década de análise intensiva dos dados¹.

Na Figura 14, os escritos em Azul são placas que não foram consideradas pelo MORVEL e as regiões com preenchimento vermelho mostram regiões de deformação (limites difusos entre placas).

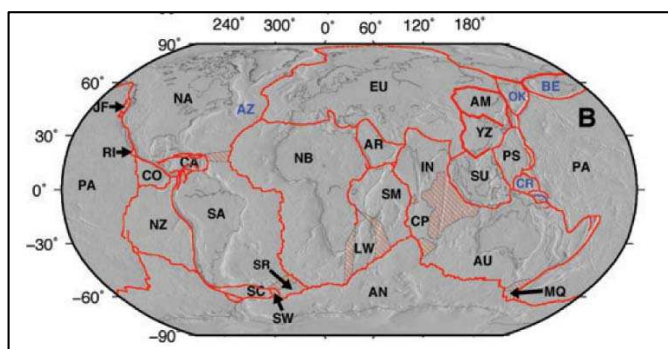


Figura 14 - Geometria dos limites de placas empregado no MORVEL.

⁷ <http://geoscience.wisc.edu/~chuck/MORVEL/>

Fonte: DeMets, Gordon e Argus (2010).

As abreviações das placas são dadas por: AM, Amur; AN, Antarctic; AR, Arabia; AU, Australia; AZ, Azores; BE, Bering; CA, Caribbean; CO, Cocos; CP, Capricorn; CR, Caroline; EU, Eurasia; IN, India; JF, Juan de Fuca; LW, Lwandle; MQ, Macquarie; NA, North America; NB, Nubia; NZ, Nazca; OK, Okhotsk; PA, Pacific; PS, Philippine Sea; RI, Rivera; SA, South America; SC, Scotia; SM, Somalia; SR, Sur; SU, Sundaland; SW, Sandwich; YZ, Yangtze. As abreviações das placas em azul não estão incluídas no MORVEL (DEMETS; GORDON; ARGUS, 2010).

A Figura 15 ilustra as posições de estações GPS (círculo) que possuem velocidades empregadas na construção do modelo MORVEL.

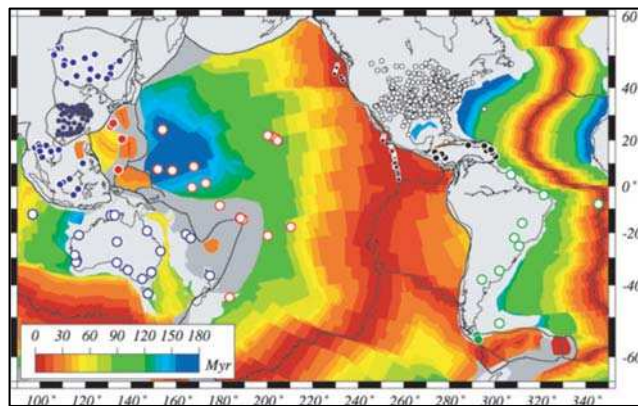


Figura 15 - Localização de estações GPS.

Fonte: DeMets, Gordon e Argus (2010).

Os círculos com preenchimento ilustram a localização de estações GPS que possuem velocidades e foram empregadas na determinação das velocidades angulares de algumas placas, dentre elas a do Caribe (preto) e da Scotia (verde). As cores indicam a idade (em milhões de anos) do fundo oceânico.

O NNR-MORVEL56 constitui um conjunto de velocidades angulares que descreve o movimento de 56 placas tectônicas relativas a um único referencial no qual a condição NNR da litosfera é determinada (ARGUS; GORDON; DeMETS, 2011). O NNR-MORVEL56 amplia o modelo MORVEL constituído por 25 placas que cobre 97,2% da superfície da Terra. O recobrimento dos 2,8% restante é conseguido pela incorporação de 31 pequenas placas definidas em Bird (2003) (ARGUS; GORDON; DeMETS, 2011). Por construção, o NNR-MORVEL56 fornece velocidades idênticas ao MORVEL para 25 placas incluídas em ambos modelos (ARGUS; GORDON; DeMETS, 2011).

As coordenadas do polo de Euler e a velocidade angular da placa SOAM segundo o modelo NNR-MORVEL56 estão disponíveis na Tabela 15.

2.9.6 GEODVEL (NNR)

Baseado na combinação de soluções provenientes de quatro técnicas da Geodésia Espacial (GPS, VLBI, SLR, DORIS) foram estimados simultaneamente as velocidades angulares de 11 maiores placas e a velocidade do centro de massa da Terra sólida (crosta, manto e núcleo). O conjunto de velocidades angulares relativas das placas foi denominado de GEODVEL (for *GEOD*es *VEL*ocity) (ARGUS et al., 2010).

Argus (2015, comunicação pessoal⁹) disponibilizou as coordenadas do polo de Euler, a velocidade angular da placa SOAM e as velocidades de translação do referencial ($\dot{\vec{T}}$) segundo o modelo GEODVEL(NNR).

Na Tabela 17 estão presentes as coordenadas do polo de Euler e velocidades angulares da placa SOAM.

Tabela 17 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
GEODVEL2010	-18,919	-131,224	0,1137

Fonte: Argus (2015, comunicação pessoal¹).

Na Tabela 18 estão as velocidades das translações estimadas em conjunto com as velocidades das placas tectônicas no modelo GEODVEL NNR.

Tabela 18 - Velocidade de translação do referencial das velocidades.

$\dot{t}_{x_v}$ (mm/ano)	$\dot{t}_{y_v}$ (mm/ano)	$\dot{t}_{z_v}$ (mm/ano)
0,08	0,27	-1,12

Fonte: Argus (2015, comunicação pessoal¹⁰).

Na Tabela 19 encontram-se as componentes cartesianas do vetor velocidade angular da placa SOAM de acordo com o modelo GEODVEL NNR.

Tabela 19 - Velocidades angulares para a placa Sul-Americana.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
GEODVEL2010 (NNR)	-0,0012371	-0,0014119	-0,0006434

Fonte: Adaptado de Argus (2015, comunicação pessoal¹).

As velocidades das estações de interesse, com esse modelo, podem ser calculadas com base na equação (53).

⁹ Correspondência eletrônica trocada no dia 02 de agosto de 2015 com o Dr. Donald F Argus. (argus@jpl.nasa.gov)

¹⁰ Correspondência eletrônica trocada no dia 02 de agosto de 2015 com o Dr. Donald F Argus. (argus@jpl.nasa.gov)

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{t}_{x_v} \\ \dot{t}_{y_v} \\ \dot{t}_{z_v} \end{bmatrix} \quad (53)$$

As velocidades obtidas com base nas componentes cartesianas do vetor velocidade angular e das velocidades do centro da Terra estão no referencial ITRF2005 (ARGUS, 2015 – Comunicação pessoal¹).

2.9.7 REVEL2000

O modelo geodésico de movimento de placa (REVEL 2000, *for Recent Velocities*) abrange 19 placas tectônicas; e o índice 2000 indica o último ano de dados inseridos na estimação do modelo (SELLA; DIXON; MAO, 2002). Estes autores acreditam que o modelo possa ser melhorado de modo significativo com a inclusão de mais dados e de séries temporais com durações maiores (SELLA; DIXON; MAO, 2002).

As coordenadas e velocidades das estações, compreendidas entre 1993 a 2000, e empregadas na estimação das velocidades angulares das placas tectônicas estão referenciados ao ITRF97.

As velocidades utilizadas para determinação do polo de Euler para a placa SOAM no modelo REVEL foram extraídas de 11 estações (ASC1, BOMJ, BRAZ, FORT, IMPZ, KOUR, LPGS, MANU, PARA, UEPP, VICO) presentes na América do Sul (SELLA; DIXON; MAO, 2002).

Na Tabela 20 estão presentes as coordenadas do polo de Euler e velocidade angular da placa SOAM.

Tabela 20 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
REVEL2000	-25,83	-135,38	0,106

Fonte: Sella, Dixon e Mao (2002).

Na Tabela 21 encontram-se as velocidades angulares cartesianas para a placa SOAM.

Tabela 21- Componentes da velocidade angular da placa SOAM.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
REVEL	-0.001189878	-0.001174240	-0.000809045

Fonte: Sella, Dixon e Mao (2002).

A Figura 18 ilustra as velocidades das estações presentes nas placas rígidas e não rígidas de acordo com o modelo REVEL2000.

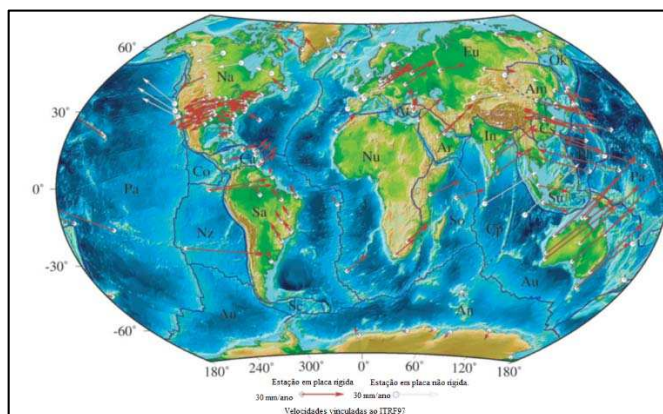


Figura 18 - Velocidades horizontais no ITRF97 segundo o modelo REVEL2000.
Fonte: Sella, Dixon e Mao (2002).

Na seção 2.9.8 é apresentado o modelo obtido com base no *Global Strain Rate Model* desenvolvido por Kreemer, Holt e Haines (2003) e Kreemer, Blewitt e Klein (2014).

2.9.8 *Global Strain Rate Model* – GSRM

O *Global Strain Rate Model* (GSRM-1) é constituído de velocidades horizontais na superfície terrestre e variações de deformações horizontais para a maioria das zonas de deformações das placas. Foram empregadas 3.000 velocidades, determinadas com base em técnicas da Geodésia espacial, obtidas de 50 diferentes estudos (KREEMER, HOLT e HAINES, 2003).

Na Figura 19, círculos representam dados regionais (campanhas), quadrados são estações incluídas na solução GEODVEL, triângulos são estações VLBI e triângulos invertidos são estações DORIS.

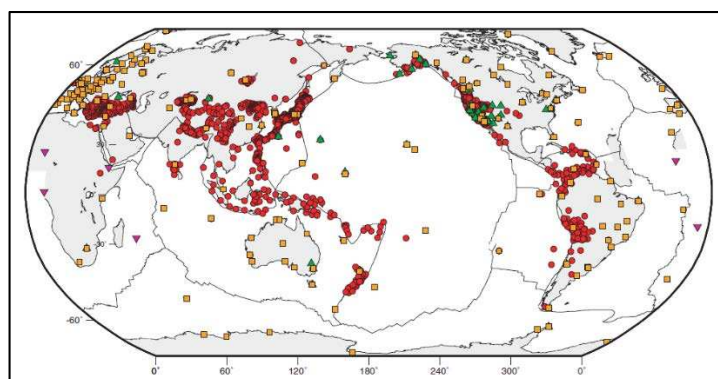


Figura 19 - Localizações das estações com velocidades conhecidas.
Fonte: Kreemer, Holt e Haines (2003).

A Figura 20 ilustra as estações empregadas na determinação do modelo GSRM-1 as quais são assumidas estarem localizadas na parte estável de cada placa (KREEMER; HOLT; HAINES, 2003).

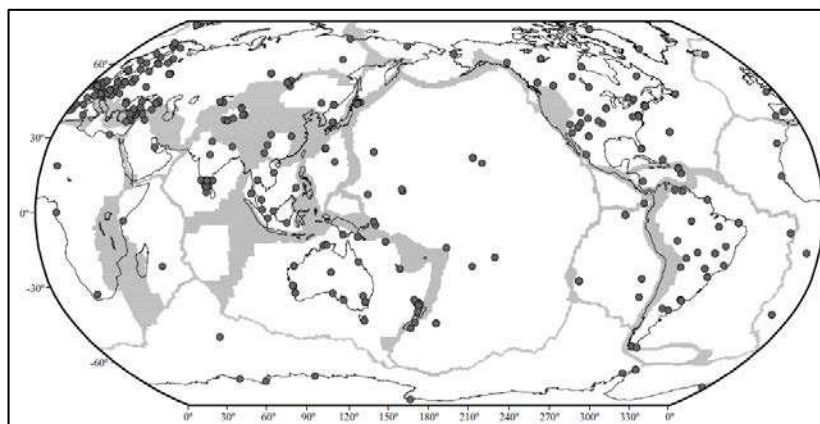


Figura 20 - Localização das estações nas placas estáveis (suposição).
Fonte: Kreemer, Holt e Haines (2003).

No modelo GSRM-1, desenvolvido por Kreemer e Holt (2001), foram estimadas as coordenadas dos polos de Euler e velocidades angulares de 19 das placas tectônicas considerando a condição NNR. Nesse modelo, além das velocidades angulares obtidas com base em técnicas da geodésia espacial, foram adicionadas velocidades angulares calculadas empregando-se dados geológicos, de sismos e de expansão do fundo oceânico (anomalias magnéticas) (KREEMER; HOLT; HAINES, 2003).

As velocidades angulares encontradas nesse modelo para a maioria dos lugares diferem significativamente das obtidas com uso do NNR-NUVEL1A (KREEMER; HOLT; HAINES, 2003).

O GSRM v.2.1 é versão melhorada das anteriores, em termos da quantidade de dados de entrada e da melhora na resolução espacial, por um fator de aproximadamente 2,5 em área com cobertura densa de dados. Foram empregados 22.415 velocidades em 18.356 locais, utilizaram 233 estudos e determinaram as velocidades angulares de 50 placas.

Na Tabela 22, estão presentes as coordenadas do polo de Euler e velocidades angulares da placa SOAM obtidos com os modelos GSRM-NNR-1 e GSRM-NNR-2.1.

Tabela 22 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
¹ GSRM-NNR-1	-14,5	-119,5	0,114
² GSRM – NNR - 2.1	-14,10	-117,86	0,123

Fonte: ¹Kreemer, Holt e Haines (2003), ²Kreemer, Blewitt e Klein (2014).

Na Tabela 23 estão as componentes cartesianas do vetor velocidade angular para a placa SOAM de acordo com os modelos GSRM-NNR-1 e GSRM-NNR-2.1.

Tabela 23 - Componentes cartesianas do vetor velocidade angular.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
¹ GSRM – NNR -1	-0,0009486	-0,0016766	-0,0004982
² GSRM – NNR - 2.1	-0,0009730	-0,0018407	-0,0005230

Fonte: Adaptado de ¹Kreemer, Holt e Haines (2003); ²Kreemer, Blewitt e Klein (2014).

Na seção 2.9.9 é apresentado o modelo de movimento para a placa SOAM desenvolvido por Costa, Santos e Gemaël (2003).

2.9.9 Modelo de Velocidade de Costa, Santos e Gemaël (2003)

A estimação do modelo de velocidade da placa Sul-Americana por Costa, Santos e Gemaël (2003) foi realizado com base nos dados GPS de dez estações IGS localizadas nas bordas da placa SOAM e placas adjacentes juntamente com 9 estações da RBMC

As observações GPS utilizadas cobriram cinco grupos e cada grupo com 15 dias. Os grupos de observações vinculados às épocas 1997,3, 1997,9, 1998,3, 1998,9 e 1999,2 com arquivos diários (24 h) com intervalos de gravação nas estações IGS de 30s e da RBMC de 15s. O processamento das observáveis GPS (modo relativo) foi realizado com emprego do Bernese. Sete estações IGS foram escolhidas e tiveram suas coordenadas vinculadas as essas épocas (COSTA; SANTOS; GEMAEL, 2003).

As coordenadas estimadas das estações estão referenciadas ao ITRF96, época 1998,2 e as velocidades também são fornecidas nesse referencial e não são vinculadas a uma época específica, pois foram obtidas da extrapolação dos resultados das coordenadas obtidas em diferentes épocas (COSTA; SANTOS; GEMAEL, 2003).

A Figura 21 ilustra a distribuição das estações da RBMC e IGS empregadas na estimação do campo de velocidades para a porção da placa SOAM.

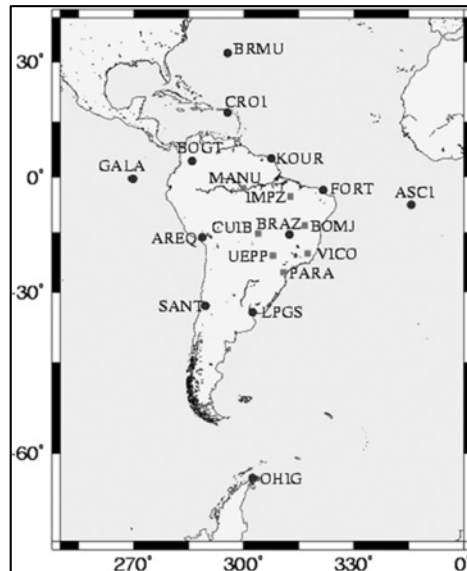


Figura 21 - Distribuição das estações da RBMC e IGS.
Fonte: Costa, Santos e Gemael (2003).

Na Tabela 24 estão presentes as coordenadas do polo de Euler e velocidade angular da placa SOAM.

Tabela 24 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
Costa, Santos e Gemael (2003)	-18,38	210,78	0,1971

Fonte: Costa, Santos e Gemael (2003).

Na Tabela 25 estão presentes componentes do vetor rotação em termos de coordenadas cartesianas para a placa SOAM.

Tabela 25 - Componentes da velocidade angular para a placa SOAM.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
Costa, Santos e Gemael (2003)	-0,0028047	-0,0016706	-0,0010847

Fonte: Adaptado de Costa, Santos e Gemael (2003).

Os resultados foram comparados com modelos geofísicos como NNR-NUVEL 1A e APKIM 8.8 e os vetores velocidades estimados para as estações da RBMC apresentaram boa concordância com esses dois modelos, com velocidade aproximadas igual a 2 cm/ano (COSTA; SANTOS; GEMAE, 2003).

2.9.10 Modelo de Velocidade de Perez, Monico e Chaves (2003)

Perez, Monico e Chaves (2003) empregaram o PPP para estimação das coordenadas (x, y, z) e velocidades (V_x, V_y, V_z) de 14 estações (LPGS, FORT, ASC1, BOMJ, BRAZ, CUIB, IMPZ, MANA, PARA, POAL, RECF, SALV, UEPP e VICO)

para obtenção dos parâmetros de rotação ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) da placa Sul-Americana. As observações GPS empregadas no PPP foram coletadas entre 28/06/1998 a 01/04/2001 e divididas em seis períodos com 15 dias cada. A solução foi referenciada ao ITRF97, época 2000,2.

A Figura 22 ilustra a distribuição espacial das estações empregadas na estimação dos parâmetros de rotação da placa SOAM.

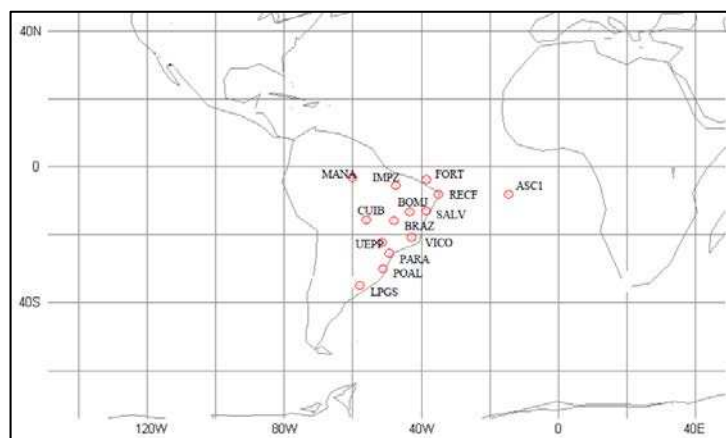


Figura 22 - Localização das estações da RBMC e IGS.

Fonte: Perez, Monico e Chaves (2003).

A Tabela 26 contém as componentes do vetor rotação para placa SOAM, segundo o modelo proposto por Perez, Monico e Chaves (2003).

Tabela 26 - Componentes da velocidade angular da placa SOAM.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
Perez, Monico e Chaves (2003).	-0,00090	-0,00186	-0,00073

Fonte: Perez, Monico e Chaves (2003).

O modelo final encontrado comparado com a solução ITRF2000 apresentou diferença máxima de 1,5 mm/ano e concordante com as incertezas das estações ITRF2000 envolvidas na estimação dos parâmetros. A comparação da solução final com o NNR-NUVEL1A, mostrou diferença máxima de 1,2 mm/ano (PEREZ; MONICO; CHAVES, 2003). Concluíram que o PPP pode ser utilizado em aplicações que requerem alto nível de precisão como vetores posição e velocidades das estações bem como o vetor de Euler.

2.9.10 Modelo de Velocidade de Souza (2013)

As coordenadas de 14 estações sobre a placa SOAM obtidas da solução semanal da rede SIRGAS-CON para o período compreendido de 2008 a 2012 foram empregadas na modelagem da placa SOAM (SOUZA, 2013).

Os arquivos selecionados foram da primeira semana dos anos 2008, 2009, 2010, 2011 e 2012 formando um total de quatro períodos. As coordenadas das primeiras semanas dos anos de 2008 a 2011 estão referenciados ao ITRF (IGS05) e do ano 2012 estão no ITRF (IGS08). Portanto, para compatibilização do referencial geodésico empregado no Brasil foi realizada a transformação dessas coordenadas para o SIRGAS2000. Os parâmetros empregados para essa mudança de referencial do ITRF (IGS05) para SIRGAS2000 e ITRF (IGS08) para SIRGAS2000 foram obtidos nos relatórios de processamento do PPP online do IBGE (SOUZA, 2013).

Com base nas coordenadas cartesianas das estações SIRGAS-CON selecionadas obtidas em cada época de um ano e do ano seguinte e do número de dias decorridos entre as duas épocas, pôde-se calcular as velocidades das estações utilizadas (SOUZA, 2013).

Na Tabela 27, encontram-se os parâmetros de rotação da placa SOAM calculados por SOUZA (2013) com base nas coordenadas semanais da solução SIRGAS-CON.

Tabela 27 - Parâmetros de rotação para a placa SOAM.

Modelo	$\omega_x(\text{rad/Ma})$	$\omega_y(\text{rad/Ma})$	$\omega_z(\text{rad/Ma})$
Souza (2013)	-0,00142186	-0,0011970247	-0,0005526803

Fonte: Souza (2013).

Souza (2013) comparou os resultados posicionais obtidos (por meio de discrepâncias) com base no modelo gerado, com os modelos VEMOS2009, NNR-NUVEL 1A, APKIM2000, APKIM8.8, ITRF2000 PMM, Costa, Santos e Gemaél (2003) e Perez, Monico e Chaves (2003).

Os resultados mostraram a possibilidade do emprego dos vários modelos quando a discrepância puder ser de até 5 cm para um intervalo de tempo de 13 anos, para algumas regiões do Brasil e a três modelos quando a discrepância não puder ultrapassar 1 cm em 13 anos (SOUZA, 2013).

As estações selecionadas na realização do estudo podem ser visualizadas na Figura 23.



Figura 23 - Estações selecionadas para a modelagem da placa Sul-Americana.
Fonte: Souza (2013).

Na seção 2.9.11 é apresentado o modelo de movimento para a placa SOAM desenvolvido por Souza e Garnés (2014).

2.9.11 Modelo de Velocidade de Souza e Garnés (2014)

Souza e Garnés (2014) utilizaram velocidades e coordenadas de 23 estações da RBMC que pertencem também a rede SIRGAS-CON para gerar, com base no conceito de polo de Euler, um novo modelo de velocidade para a placa Sul-Americana. Os dados foram obtidos em* e são provenientes da solução multianual SIR11P01.

Na Figura 24, visualiza-se a distribuição espacial das estações empregadas na estimação das coordenadas do polo de Euler e velocidade angular para a placa SOAM.

* <http://www.sirgas.org/index.php?id=148>

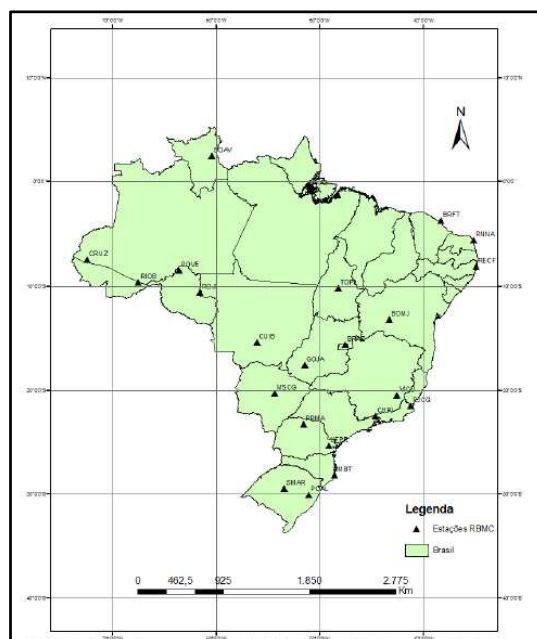


Figura 24 - Localização das estações utilizadas na modelagem da placa SOAM.

Fonte: Souza e Garnés (2014).

As velocidades e as coordenadas das estações da rede SIRGAS-CON obtidas da solução multianual (SIR1101P01) são disponibilizadas no referencial ITRF2008. As coordenadas estão na época 2005,0.

A modelagem foi realizada considerando a parte estável da placa Sul-Americana, pois em sua extremidade ocorrem deformações em consequência das tensões entre placas, impedindo que o modelo utilizando o polo de Euler seja uma boa solução (SOUZA, 2013).

Na Tabela 28, estão disponíveis os parâmetros de rotação estimados para placa Sul-Americana.

Tabela 28 - Parâmetros de rotação para a placa SOAM.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
Souza e Garnés (2014)	-0,0013741432	-0,0013598302	-0,0005654497

Fonte: Souza e Garnés (2014).

Souza e Garnés (2014) não apresentaram as precisões dos parâmetros de rotação estimados. Desse modo, não é possível determinar os desvios padrão das velocidades cartesianas geocêntricas das estações e, conseqüentemente, as precisões das coordenadas atualizadas para a época (t) serão iguais às da época origem (t_0).

Usando o modelo VEMOS2009 como referência calcularam as discrepâncias do vetor resultante em latitude e longitude e encontraram valores concordantes em relação ao VEMOS, pois em 15 anos daria um erro máximo 3 cm na atualização das coordenadas para a época 2000,4 (SOUZA; GARNÉS, 2014).

2.9.12 Modelo de Velocidade MV Carvalho

A estimação das componentes cartesianas do vetor velocidade angular da placa SOAM foi realizada seguindo as etapas descritas na seção 3.2.5. As coordenadas e velocidades no ITRF2008 das estações da RBMC empregadas na modelagem são provenientes da solução multianual de rede SIRGAS-CON denominada de SIR11P01 e foram obtidas em 1¹¹ e 2¹².

Na estimação das componentes cartesianas do vetor velocidade angular para a placa SOAM do modelo MV_Carvalho foram empregados dados de 40 estações, as quais podem ser visualizadas na Figura 25. O teste estatístico qui-quadrado foi aplicado para verificação da compatibilidade das variâncias *a priori* e *a posteriori* e não foi encontrada igualdade estatística entre essas variâncias a 5% de significância. As coordenadas do polo de Euler e a velocidade angular da parte estável da placa SOAM foram calculadas com base nas componentes cartesianas do vetor velocidade angular estimadas.

A Figura 25 ilustra a distribuição espacial das estações da RBMC/SIRGAS-CON empregadas na estimação dos parâmetros de movimento da placa SOAM no modelo MV Carvalho.



Figura 25 - Distribuição espacial das 40 estações da RBMC/SIRGAS-CON.

¹¹ <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/SIR11P01.CRD>

¹² <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/SIR11P01.VEL>

Na Tabela 29, estão presentes componentes do vetor rotação em termos de coordenadas cartesianas e respectivas precisões para a placa SOAM obtidas do ajustamento descrito na seção 3.2.5.

Tabela 29 - Componentes e precisões da velocidade angular da SOAM.

Modelo	$\omega_x(\text{rad/Ma})$	$\omega_y(\text{rad/Ma})$	$\omega_z(\text{rad/Ma})$
MV_Carvalho	-0,0013849	-0,0013364	-0,0005645
	$\pm 0,00010$	$\pm 0,00011$	$\pm 0,00005$

As coordenadas do polo de Euler, velocidade angular e respectivas precisões foram calculadas a partir das componentes cartesianas do vetor velocidade angular da placa SOAM

Na Tabela 30, estão presentes as coordenadas do polo de Euler e velocidade angular da placa SOAM.

Tabela 30 - Coordenadas do polo de Euler e velocidade angular e respectivas precisões.

Modelo	$\Phi (^{\circ})$	$\Lambda (^{\circ})$	$\ \vec{\Omega}\ (^{\circ}/\text{Ma})$
MV_Carvalho	-16,34781	-136,021316	0,114915
	$\pm 1,34851$	$\pm 4,33733$	$\pm 0,00207$

A Figura 26 ilustra as normas dos vetores velocidades e a direção dos deslocamentos de 40 estações obtidas com base em 19 modelos de velocidade para a placa SOAM.

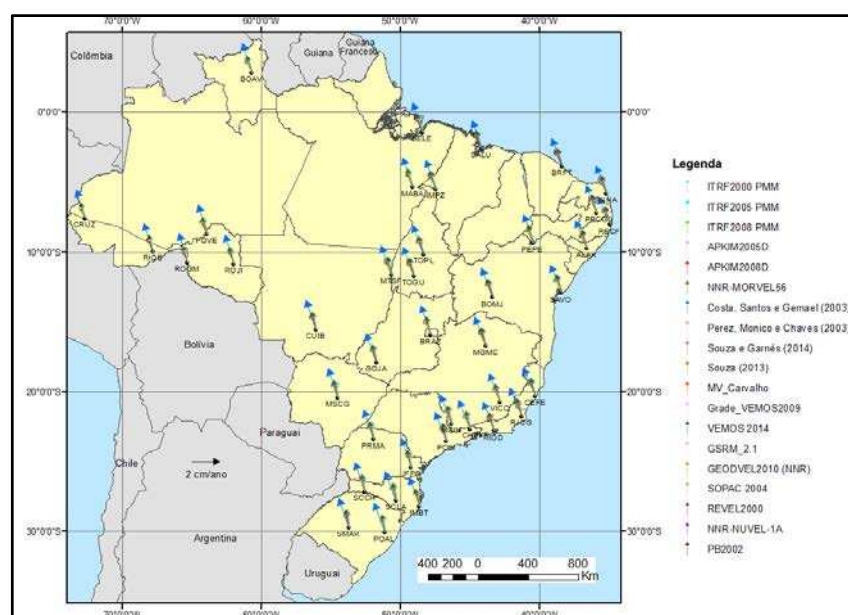


Figura 26 - Velocidades das estações obtidas com 19 modelos de movimento da placa SOAM.

A Tabela 31 contém os valores de média e amplitude total (AT) para a norma do vetor velocidade e direção do deslocamento obtidos com base nas 40 estações da Figura 26 e 19 modelos de velocidades.

Tabela 31- Direção e magnitude médias das velocidades das estações da Figura 26.

Modelos de Velocidade	Norma do vetor velocidade		Azimute/direção	
	Média (m/ano)	AT (m/ano)	Média (°)	AT (°)
ITRF2000	0,012	0,002	340,05	7,95
ITRF2005	0,013	0,002	345,70	10,53
ITRF2008	0,012	0,002	342,90	12,45
APKIM2005D	0,012	0,004	347,31	17,88
APKIM2008D	0,013	0,003	344,38	15,44
NNR-MORVEL56	0,011	0,004	342,03	22,23
Costa, Santos e Gemaél (2003)	0,022	0,001	339,47	7,16
Perez, Monico e Chaves (2003)	0,012	0,004	345,25	19,96
Souza e Garnés (2014)	0,013	0,002	344,98	7,30
Souza (2013)	0,012	0,001	343,66	6,12
MV_Carvalho	0,013	0,001	344,78	7,11
Grade_VEMOS2009	0,011	0,002	342,45	21,22
VEMOS 2014	0,013	0,002	343,23	7,59
GSRM_2.1	0,012	0,004	350,75	18,06
GEODVEL2010 (NNR)	0,011	0,002	342,77	10,90
SOPAC 2004	0,012	0,001	340,17	7,45
REVEL2000	0,012	0,001	335,58	7,78
NNR-NUVEL-1A	0,012	0,003	337,82	14,12
PB2002	0,012	0,003	337,87	14,13

Verifica-se a partir dos dados presentes na Tabela 31 que a amplitude total máxima das médias das normas do vetor velocidade, obtidas com base em 19 modelos de velocidade para a placa SOAM é de 1,1 cm/ano e de 16,11° para a direção do deslocamento da estação.

A direção e magnitude médias das velocidades obtidas com o modelo MC_Carvalho são, respectivamente, iguais à 344,78° e 1,3 cm/ano. A amplitude total da direção do vetor velocidade das estações é de 7,1° e da norma desse vetor de 0,1 cm/ano.

O modelo de velocidade VEMOS2009 é tratado na seção 2.9.13, onde a grade desse modelo está referenciada ao ITRF2005.

2.9.13 Modelo de Velocidade para o SIRGAS

As formas para obtenção das velocidades das estações na área de abrangência do SIRGAS com base na grade do modelo de velocidade horizontal VEMOS2009 e VEMOS2014 (SIR14P01) são tratadas na seção 2.9.13.1. Na seção 2.9.13.1 a obtenção

das velocidades é realizada com base no aplicativo VMS2009 e no polo de Euler para o VEMOS2014 (SIR14P01). Na seção 3.2.7 é empregado o método de interpolação pelo inverso da distância e da grade do VEMOS2009 para determinação das velocidades das estações de interesse.

2.9.13.1 VEMOS2009 (Velocity MOdel for SIRGAS - 2009)

Para os propósitos geodésicos é fundamental o conhecimento de um campo contínuo de velocidade que permita a predição das velocidades das estações (DREWES; HEIDBACH, 2012). O primeiro modelo de velocidade desenvolvido para a placa Sul-Americana foi elaborado em 2003 e desde então dados adicionais de vários projetos geodésicos e geodinâmicos tornaram-se disponíveis, o que possibilitou o desenvolvimento aprimorado de um modelo de movimento de placa (DREWES; HEIDBACH, 2012).

O campo de velocidade horizontal para América do Sul e Caribe 2009 foi desenvolvido por Drewes e Heidbach (2012) e é denominado de (VEMOS2009). É empregado na atualização das coordenadas planimétricas (latitude e longitude) calculadas na data em que os dados foram coletados para época de referência do referencial oficial (DREWES; HEIDBACH, 2012; SIRGAS, 2015).

O VEMOS2009 foi calculado a partir das coordenadas SIRGAS95 e SIRGAS2000, e das velocidades das estações SIRGAS-CON determinadas pelo IGS-RNAAC-SIR e de diferentes projetos geodinâmicos desenvolvidos na região (DREWES; HEIDBACH, 2009). Esse conjunto de dados foi processado utilizando o método de elementos finitos, colocação por mínimos quadrados com função de correlação empírica para o cálculo de um novo campo de velocidade para as placas Sul-Americana e do Caribe (DREWES; HEIDBACH, 2012).

O modelo VEMOS2009 é representado por meio de uma grade de velocidades horizontais espaçadas de 1° por 1° de latitude e longitude que podem ser interpoladas pelo programa VMS2009 disponível no endereço¹³ ou por algum software desenvolvido para esta finalidade.

Alguns pesquisadores como Prol et al. (2014) e Souza e Garnés (2014) criaram aplicativos que realizam interpolação, pelos métodos inverso da distância e bilinear, das

¹³ www.sirgas.org/fileadmin/docs/Vemos2009.zip

velocidades com base na grade do modelo VEMOS2009. O autor desta pesquisa também implementou o interpolador pelo inverso da distância para determinação das velocidades das estações.

A precisão média alcançada na estimação das velocidades com esse modelo é cerca de 1,5 mm/ano (SÁNCHEZ et al., 2013). De acordo com Souza e Garnés (2014), o modelo VEMOS2009 possui para o território brasileiro boa consistência em relação aos dados da RBMC/SIRGAS-CON, pois apresentou em testes realizados erro máximo de 3 cm para variação posicional no período de 15 anos.

A Figura 27 ilustra o campo de velocidade para América do Sul e Caribe segundo o modelo VEMOS2009.

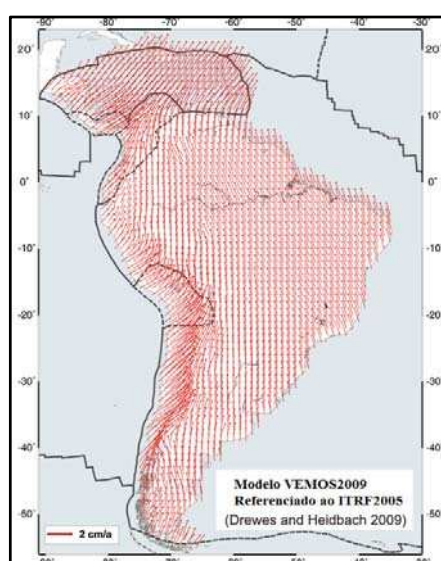


Figura 27 - Campo de velocidade para a América do Sul de Caribe.
Fonte: Drewes e Heidbach (2009).

Na Figura 28, pode-se visualizar um trecho do arquivo da grade do VEMOS2009.

VELOGRID - Bloco de notas				
Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
VEMOS2009 in ITRF2005 (Drewes and Heidbach 2009)				
20.00	-76.00	0.0106	0.0076	
20.00	-75.00	0.0112	0.0075	
20.00	-74.00	0.0118	0.0079	
20.00	-73.00	0.0124	0.0084	
20.00	-72.00	0.0130	0.0083	
19.00	-80.00	0.0080	0.0062	
19.00	-79.00	0.0089	0.0065	
19.00	-78.00	0.0097	0.0068	
19.00	-77.00	0.0094	0.0068	
19.00	-76.00	0.0103	0.0076	
19.00	-75.00	0.0114	0.0078	
19.00	-74.00	0.0119	0.0080	
19.00	-73.00	0.0123	0.0080	
19.00	-72.00	0.0125	0.0073	
19.00	-71.00	0.0132	0.0073	
19.00	-70.00	0.0128	0.0072	
19.00	-69.00	0.0126	0.0080	
19.00	-68.00	0.0124	0.0084	
19.00	-67.00	0.0122	0.0089	
19.00	-66.00	0.0124	0.0090	
19.00	-65.00	0.0125	0.0092	
19.00	-64.00	0.0129	0.0088	
19.00	-63.00	0.0132	0.0090	
19.00	-62.00	0.0133	0.0091	
18.00	-81.00	0.0102	0.0061	
18.00	-80.00	0.0102	0.0065	
18.00	-79.00	0.0102	0.0070	
18.00	-78.00	0.0098	0.0071	
18.00	-77.00	0.0082	0.0065	

Figura 28 - Grade de velocidade do VEMOS2009.
Fonte: Drewes e Heidbach (2009).

Na Figura 28, a primeira e segunda coluna encontram-se a latitude e longitude e na terceira e quarta coluna estão disponíveis as velocidades (no ITRF) para latitude e longitude em metros por ano. Salienta-se que as velocidades (V_ϕ, V_λ) foram transformadas com o uso do programa VMS para velocidades cartesianas (v_x, v_y, v_z) as quais foram empregadas na interpolação. Ressalta-se que esta transformação poderá ser realizada com base na equação (50).

Um novo modelo ou atualização do VEMOS foi criado e é denominado de modelo geodésico SIR14P01 ou VEMOS2014. Segundo Drewes e Sánchez (2014), é um modelo multianual com coordenadas fixas à época 2013,0 e suas variações temporais lineares (velocidades constantes).

No cálculo do VEMOS2014, foram incluídas medições GNSS entre março de 2010 e junho de 2014 de estações com mais de dois anos de operação. Foram empregadas coordenadas e velocidades de 242 estações (Drewes e Sánchez, 2014).

A Figura 29 ilustra as velocidades horizontais das estações SIRGAS obtidas na solução SIR14P01.

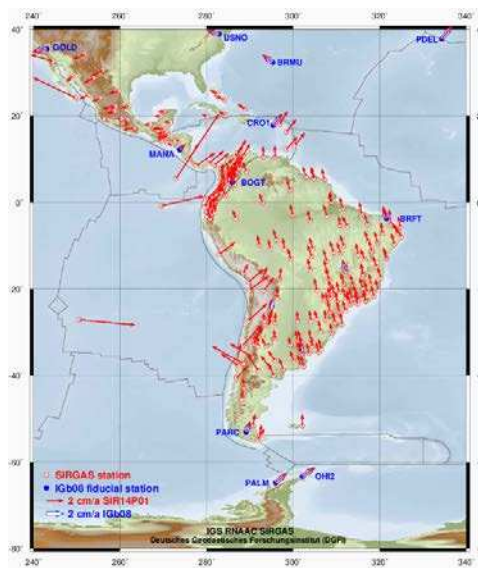


Figura 29 - Vetores velocidades nas estações da rede SIRGAS.
Fonte: Sánchez, Drewes e Schmidt (2015).

As coordenadas do polo de Euler e a velocidade angular para as placas da América do Sul e do Caribe foram calculadas para o modelo VEMOS2014 (SIR14P01) (DREWES; SÁNCHEZ, 2014).

Na Tabela 32, estão disponíveis os parâmetros de polo de Euler estimados para placa SOAM com base no modelo SIR14P01 (VEMOS2014).

Tabela 32 - Parâmetros do polo de Euler para a placa SOAM.

Modelo	Φ (°)	Λ (°)	$\ \vec{\Omega}\ $ (°/Ma)
VEMOS2014 (SIR14P01)	$-18,2 \pm 1,0$	$225,2 \pm 1,3$	$0,121 \pm 0,001$

Fonte: Drewes e Sánchez (2014).

Na Tabela 33 estão disponíveis as componentes do vetor velocidade angular placa SOAM com base no modelo geodésico VEMOS2014 (SIR14P01).

Tabela 33 - Componentes da velocidade angular da placa Sul-Americana.

Modelo	ω_x (rad/Ma)	ω_y (rad/Ma)	ω_z (rad/Ma)
VEMOS2014(SIR14P01)	-0,0014136	-0,0014235	-0,0006596

Fonte: Adaptado Drewes e Sánchez (2014).

A Figura 30, ilustra os modelos de deformação baseados no VEMOS2014 e VEMOS2009.

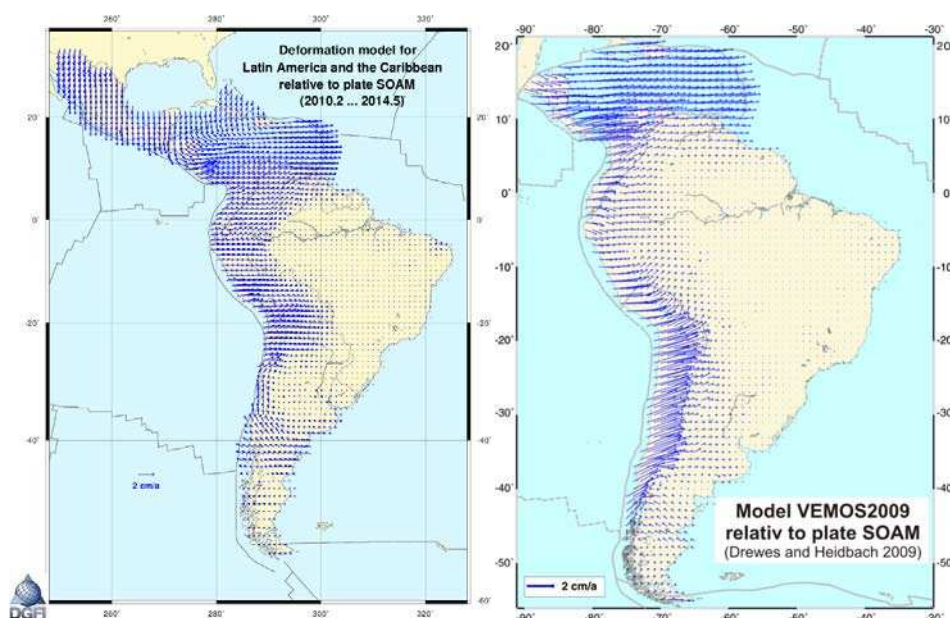


Figura 30 - Modelo de deformação para o VEMOS2014 (esquerda) e VEMOS2009 (direita).

Fonte: Drewes e Sánchez (2014).

Segundo Drewes e Sánchez (2014), as maiores diferenças aparecem na zona do terremoto Maule. O modelo VEMOS2014 é válido para os movimentos médios do período de 2010 a 2014 e não se podem extrapolar as velocidades, já que não são constantes em diferentes períodos, pois após a ocorrência de sismos, leva-se um período de recuperação das velocidades. Estes autores recomendam que o VEMOS seja calculado periodicamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Nesta pesquisa foram empregados arquivos diários em formato RINEX (*Receiver Independent EXchange Format*) descompactado e compactado (Hatanaka) das observáveis GPS coletadas a cada 15 s e disponibilizados pelo IBGE e IGN, mantenedores, respectivamente, dos projetos RBMC e RAMSAC; efemérides precisas GPS (final), no formato .SP3 (*Standard Product 3*) disponibilizadas pelo IGS; modelos de movimento para a placa Sul-Americana; coordenadas e velocidades das estações da rede SIRGAS-CON (solução SIR11P01 e semanais) e das coordenadas das estações da RBMC, as quais tem suas posições referenciadas ao ITRF2008, IGB08 e SIRGAS2000; software comercial *Leica Geo Office Combined* (LGO) v. 6.0 para processamento das observáveis GPS no modo relativo; programa RNXCMP para descompactar o arquivo das observações no formato RINEX; o AUSPOS – *Online GPS Processing Service*; programa MATLAB R2012b para automação do processo de atualização, mudança de referencial das coordenadas e velocidades, cálculo das velocidades das estações com base em diferentes modelos de velocidade para a placa SOAM e velocidades fornecidas pelos usuários; realização de ajustamento livre com testes estatísticos qui-quadrado e teste data snooping, ajustamento injuncionado (injunções relativas na forma de parâmetros ponderados); estimação dos 14 parâmetros da transformação de Helmert e das componentes cartesianas do vetor velocidade para a placa SOAM e do vetor velocidade angular e latitude e longitude do polo de Euler; aplicativo online, denominado de *GNSS Calendar*, disponível no site¹⁴ para baixar as efemérides precisas do site do IGS.

As estações da RBMC e da rede RAMSAC foram selecionadas e realizou-se o *download* das observáveis GPS nos sites do IBGE¹⁵ e IGN¹⁶. Dados de três dias consecutivos (sessões) (04/08/2015 a 06/08/2015) foram baixados e empregados de forma que os vetores linha de base empregados na estimação das coordenadas das estações de interesse fossem independentes.

¹⁴ http://www.asgeupos.pl/webpg/graph/dwnld/gpscalendar_EN.html

¹⁵ http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/download/tela_inicial.php?tipo=8

¹⁶ <http://ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinex>

3.2 Métodos

3.2.1 Planejamento das sessões GPS e Ajustamento

Uma sessão de observações GPS corresponde ao intervalo de tempo ininterrupto em que os receptores coletam observações em vários pontos simultaneamente. Em função da natureza do projeto e sua extensão, uma rede pode possuir poucas ou muitas estações e possuir ou não configurações complexas (GHILANI, 2010).

Após a escolha do local e posterior materialização dos pontos da rede, realiza-se o planejamento para determinar como e com que frequência as observações serão realizadas.

No posicionamento GPS em rede ou no transporte de coordenadas, está implícito o emprego do método relativo estático e a sequência planejada para as sessões deverá ser seguida. De modo geral, redes GPS são medidas em sessões, as quais são obtidas com base no rastreamento simultâneo por um certo período de tempo (SEEBER, 2003).

Cada estação da rede GPS deve estar conectada a pelo menos uma estação da sessão anterior por um vetor linha de base independente. Quando três ou mais receptores são utilizados simultaneamente em um posicionamento multiestação, pode-se otimizar o levantamento de forma que se ganhe em economia, acurácia e confiabilidade (MONICO, 2008).

O número total de linhas de base presentes em uma sessão de observação é dado pela seguinte expressão (SEEBER, 2003):

$$V_p = \frac{r \cdot (r-1)}{2} \quad (54)$$

Sendo:

V_p : número de vetores possíveis em uma única sessão de observação; r : número de receptores operando simultaneamente.

De acordo com Seeber (2003) e Ghilani (2010), no ajustamento das componentes dos vetores linhas de base em rede GPS, deve-se utilizar apenas linhas de base independentes para que não se superestime a precisão. Se três receptores estiveram coletando observáveis GPS, três vetores linhas de base serão gerados, dos quais, dois são independentes.

O número de linhas de base independentes em uma sessão de observação é dado por (SEEBER, 2003):

$$V_i = r - 1 \quad (55)$$

Sendo:

V_i : número de vetores independentes por sessão de observação.

No caso de dois receptores serem empregados em uma sessão, apenas um vetor linha de base é gerado. Na figura 31, o receptor GPS instalado em A é a estação de controle, e o instalado em B é a estação cujas coordenadas da estação de interesse desejam-se determinar.

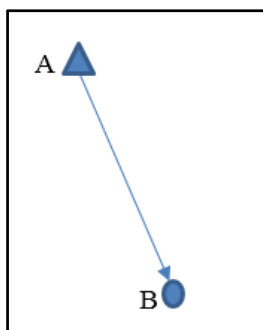


Figura 31 - Transporte de coordenadas sem observações redundantes.

Quando mais de dois receptores são utilizados de forma concomitante, são obtidos vetores linhas de base independentes e dependentes. Deste modo, do total vetores de linhas de base resultantes selecionam-se apenas independentes para a realização do ajustamento (GHILANI, 2010).

A Figura 32 ilustra o transporte de coordenadas com base em duas estações de controle para determinação de uma estação de interesse. Portanto, como há observações redundantes é possível empregar o ajustamento de observações na estimação das coordenadas da estação C.

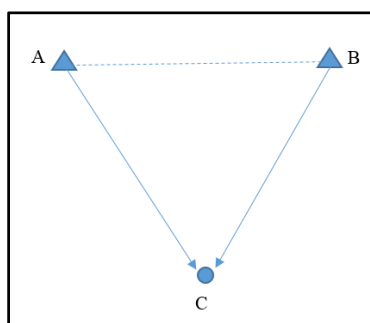


Figura 32 - Transporte de coordenadas com observações redundantes.

Dos vetores linhas de base AC, BC e AB obtidos do processamento dos dados provenientes de uma sessão de observação, apenas o AB é dependente.

Na Figura 33, estão apresentados os vetores linhas de base possíveis e independentes.

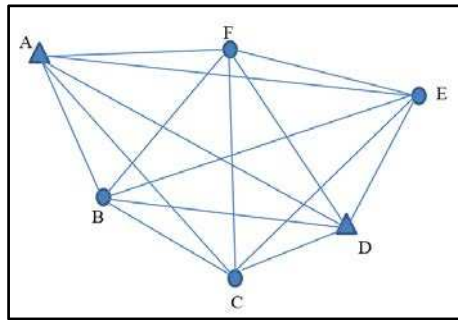


Figura 33 - Rede formada por todas as linhas de base possíveis (dependentes e independentes).

O emprego de uma sessão de observação nos pontos da rede ilustrada na Figura 33 não permite a conexão de todas as estações com vetores linhas de base independentes.

A Figura 34 ilustra as estações da rede da Figura 33 conectadas por vetores linha de base independentes provenientes de duas sessões de observação.

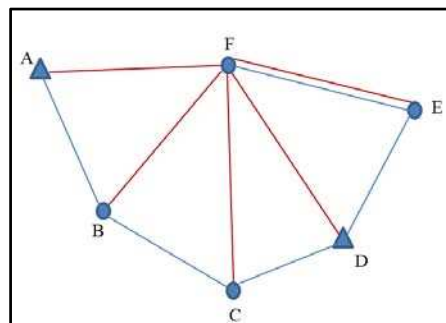


Figura 34 - Rede formada por linhas de base independentes.

Duas sessões de observação possibilitaram a formação da rede da Figura 34 com o uso apenas de linhas de base independentes e a geração de uma linha de base EF ou FE repetida. Salienta-se que não há vetor linha de base ligando as duas estações de controle.

3.2.2 Ajustamento das componentes dos vetores linha de base

A existência de observações redundantes nos levantamentos topográficos e geodésicos permite o emprego do modelo paramétrico de ajustamento para estimar o valor único para os parâmetros (coordenadas) e respectivas precisões (KRAKIWSKY, 1975, MIKHAIL; ACKERMANN, 1976; GEMAEL, 1994; DALMOLIN, 2004).

O ajustamento por mínimos quadrados trabalha com duas componentes: o modelo matemático funcional e o modelo estocástico. O modelo matemático descreve as propriedades determinísticas da realidade física, ou seja, procura representar matematicamente as relações entre observações e parâmetros. O modelo estocástico

descreve as propriedades não determinísticas ou probabilísticas das variáveis envolvidas, ou seja, das observações (MIKHAIL, ACKERMANN, 1976).

Segundo Gemaél (1994) o modelo paramétrico de ajustamento é também conhecido por método das equações de observações indiretas, onde as observações ajustadas são expressas explicitamente como função dos parâmetros ajustados.

$$\vec{L}_a = F(\vec{X}_a) \quad (56)$$

Sendo:

$\vec{L}_a$: vetor das observações ajustadas; e

$\vec{X}_a$: vetor dos parâmetros ajustados.

O processamento das observáveis GPS no posicionamento relativo (linha de base simples) proporciona as componentes dos vetores linhas de base e respectivas matrizes variância-covariância. Conforme apresentado em (57) e (58) (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER, WASLE, 2008):

$$\vec{L}_{AB} = \begin{bmatrix} \Delta x_{AB} = x_B - x_A \\ \Delta y_{AB} = y_B - y_A \\ \Delta z_{AB} = z_B - z_A \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$\Sigma_{\Delta x_{AB} = \vec{L}_{AB}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta x_{AB}}^2 & \sigma_{\Delta x_{AB} \Delta y_{AB}} & \sigma_{\Delta x_{AB} \Delta z_{AB}} \\ \sigma_{\Delta y_{AB} \Delta x_{AB}} & \sigma_{\Delta y_{AB}}^2 & \sigma_{\Delta y_{AB} \Delta z_{AB}} \\ \sigma_{\Delta z_{AB} \Delta x_{AB}} & \sigma_{\Delta z_{AB} \Delta y_{AB}} & \sigma_{\Delta z_{AB}}^2 \end{bmatrix} \quad (58)$$

Sendo:

$\vec{L}_{AB}$: vetor linha de base AB; e

$\Sigma_{\Delta x_{AB} = \vec{L}_{AB}}$: MVC do vetor linha de base AB.

No contexto de rede GPS ou no transporte de coordenadas com o emprego de duas ou mais estações de controle, os vetores linhas de base são processados individualmente e não apresentam correlação. O bloco (3x3) expresso em (58) corresponde a MVC de um vetor linha de base. Desse modo, a MVC das observações terá a forma bloco diagonal conforme apresentado em (59).

$$\Sigma \vec{L}b = \begin{bmatrix} \Sigma \vec{L}b_i & 0 & \dots \\ 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & \Sigma \vec{L}b_n \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$P = \sigma_0^2 \cdot \Sigma_{\vec{L}_b}^{-1} \quad (60)$$

O modelo funcional (F) para as equações de observação formadas para as linhas de base é linear e, portanto, os parâmetros ajustados são obtidos diretamente por (61) (DALMOLIN, 2004):

$$\vec{X}_a = \left(A^T \cdot P \cdot A \right)^{-1} A^T \cdot P \cdot \vec{L}_b \quad (61)$$

Sendo:

$\vec{X}_a$: vetor dos parâmetros ajustados;

A: matriz dos coeficientes das incógnitas ou matriz jacobiana, que por sua vez é composta por elementos 1, 0 e -1 em caso de redes GPS;

σ_0^2 : fator de variância *a priori*;

P: matriz dos pesos; e

$\vec{L}_b$: vetor das observações brutas (componentes do vetor linha de base).

O vetor dos resíduos a serem aplicados nas observações é dado por:

$$\vec{V} = A \cdot \vec{X}_a - \vec{L}_b \quad (62)$$

O vetor das observações ajustadas ($\vec{L}_a$) é calculado com base na equação (63)

$$\vec{L}_a = \vec{L}_b + \vec{V} \quad (63)$$

A matriz dos pesos é obtida multiplicando-se a variância *a priori*, geralmente arbitrado igual a 1, pela inversa da MVC das componentes dos vetores linhas de base. De acordo com Gemaél (1994), a variância *a priori* não tem influência no vetor solução dos parâmetros estimados, mas somente na matriz dos coeficientes das equações normais ($A^T \cdot P \cdot A$).

As precisões das estações de controle poderão ser inseridas no ajustamento por meio de injunções de posição com base no emprego parâmetros observados (injunções relativas). A introdução das injunções na forma de parâmetros ponderados é feita acrescentando à matriz A as linhas correspondentes aos coeficientes das injunções (0 ou 1) e sendo as injunções definida na forma de submatriz na matriz dos pesos (MARINI, 2002).

Na MVC das observações foram acrescentadas as precisões das coordenadas das estações de controle. Ressalta-se que um valor de desvio padrão da ordem do décimo de milímetro é suficiente para fixar as coordenadas das estações de controle, ou seja, ter-se-

á uma injunção absoluta. De modo análogo, a inserção das precisões das estações possibilitará a variabilidade dessas de acordo com suas variâncias.

A MVC das observações (59) após introdução das injunções com base em parâmetros ponderados terá a forma:

$$P = \sigma_0^2 \cdot \begin{bmatrix} \Sigma \vec{L}_b & 0 \\ 0 & \Sigma_{\vec{X}} \end{bmatrix}^{-1} \quad (64)$$

Sendo:

$\Sigma_{\vec{X}}$: MVC dos parâmetros ponderados.

O vetor das observações ($\vec{L}$) é formado pela adição dos valores das coordenadas dos pontos de injunção. A forma final deste vetor é:

$$\vec{L} = \begin{bmatrix} \vec{L} \\ \vec{X} \end{bmatrix} \quad (65)$$

A matriz (A) das derivadas parciais das observações em relação aos parâmetros é obtida acrescentando-se às linhas desta matriz, as derivadas parciais dos parâmetros observados em relação aos parâmetros. É importante notar que no número de parâmetros já está sendo considerados no número de estações injuncionadas.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{obs.}}{\partial \vec{X}} \\ \frac{\partial F_{para.pond.}}{\partial \vec{X}} \end{bmatrix} \quad (66)$$

O vetor dos resíduos é composto de valores de resíduos das observações e dos parâmetros ponderados.

O vetor dos resíduos é obtido por:

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} \vec{V}_{\vec{L}_b} \\ \vec{V}_{\vec{X}} \end{bmatrix} \quad (67)$$

O vetor dos parâmetros ajustados contém informações das novas coordenadas da rede e dos pontos de injunção.

$$\vec{X}_a = \begin{bmatrix} \vec{X}_{a1} \\ \vec{X}_{a2} \end{bmatrix} \quad (68)$$

O fator de variância da unidade de peso *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$) é estimado por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\vec{V}^T \cdot P \cdot \vec{V}}{n - u} \quad (69)$$

Sendo:

$n - u$: graus de liberdade.

As matrizes cofatoras dos parâmetros, dos resíduos e observações ajustados e dos resíduos são dadas, respectivamente, por (LEICK, 2004, GHILANI, 2010):

$$Q_{\bar{x}_a} = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \quad (70)$$

$$Q_{\bar{v}} = P^{-1} - A \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \quad (71)$$

$$Q_{\bar{L}_a} = Q_{\bar{L}_b} - Q_{\bar{v}} \quad (72)$$

A MVC estimada dos parâmetros e observações ajustados e dos resíduos são dadas, respectivamente, por (LEICK, 2004; GHILANI, 2010):

$$\Sigma_{\bar{x}_a} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q_{\bar{x}_a} \quad (73)$$

$$\Sigma_{\bar{L}_a} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q_{\bar{L}_a} \quad (74)$$

$$\Sigma_{\bar{v}} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q_{\bar{v}} \quad (75)$$

3.2.3 Testes estatísticos empregados no ajustamento

No ajustamento por mínimos quadrados, assume-se que os erros sistemáticos e *outliers* tenham sido eliminados e a existência apenas de erros aleatórios.

Utilizam-se o teste Qui-quadrado e *data snooping*, respectivamente, para detecção e localização de *outliers* (KUANG, 1996).

O teste Qui-quadrado é aplicado na realização do ajustamento minimamente injuncionado para testar a compatibilidade da variância *a posteriori* com a variância *a priori* (hipótese nula).

Se a hipótese nula no teste Qui-quadrado for rejeitada a um nível de significância $\alpha\%$, realiza-se uma investigação das possíveis causas da falha. As possíveis causas deverão ser verificadas e se a desconfiança recair sobre a hipótese da presença de *outliers* é aplicado teste *data snooping* para sua localização.

3.2.3.1 Teste Qui-quadrado (χ^2)

Este teste é utilizado para verificar a compatibilidade da variância *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$) com a variância *a priori* (σ_0^2). Esta comparação é feita considerando que $(\bar{v}^T \cdot P \cdot \bar{v})$ tem distribuição Qui-quadrado com graus de liberdade (g_1) e é utilizada como indicador da qualidade do ajustamento.

Na aplicação do teste bilateral estabelece-se a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_a).

As hipóteses nula e alternativa são iguais a:

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \quad (76)$$

$$H_a : \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 \quad (77)$$

O valor da estatística do teste (Qui-quadrado calculado) é dado por:

$$\chi_c^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \cdot gl = \frac{\sigma_0^2 \cdot \vec{V}^T \Sigma_{\text{lb}}^{-1} \vec{V}}{\sigma_0^2} = \vec{V}^T \cdot \Sigma_{\text{lb}}^{-1} \cdot \vec{V} \quad (78)$$

O valor do Qui-quadrado calculado deverá estar contido no intervalo de confiança $(1-\alpha)$ para que a hipótese básica não seja rejeitada (KRAKIWISK et al., 1999). Assim, tem-se que:

$$\chi_{gl; \frac{\alpha}{2}}^2 < gl \cdot \hat{\sigma}_0^2 < \chi_{gl; 1-\frac{\alpha}{2}}^2 \quad (79)$$

Caso o valor do qui-quadrado calculado não esteja contido no intervalo dado em (79), rejeita-se a hipótese nula (76). E desse modo, o ajustamento apresenta problema e as seguintes causas deverão ser investigadas (GEMAEL, 1994):

- a) Presença de *outliers* nas observações;
- b) Modelo matemático incorreto;
- c) Presença de efeitos sistemáticos;
- d) Superestimativa ou subestimativa dos pesos das observações; e
- e) Sistema mal condicionado.

De acordo com Krakiwisk *et al.* (1999), o ajustamento de linhas de base GPS geralmente não passa nesse teste estatístico, devido superestimativa da qualidade dos componentes vetoriais.

3.2.3.2 Teste data Snooping

A matriz cofatora dos resíduos ($Q_{\bar{v}}$) pode ser empregada estatisticamente para detectar *outliers* nas observações (GOUDARZI; COCARD; SANTERRE, 2014). Os resíduos padronizados podem ser calculados com base nos elementos da diagonal de ($Q_{\bar{v}}$) (GHILANI, 2010):

$$\bar{v}_i = \frac{v_i}{\sqrt{q_{ii}}} \quad (80)$$

Onde:

$\bar{V}_i$: resíduo padronizado; V_i : resíduo da observação; e Q_{ii} : cofator obtido da diagonal da matriz cofatora dos resíduos ($Q_{\bar{v}}$).

O desvio padrão dos resíduos pode ser calculado por $\hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_{ii}}$ (GHILANI, 2010). A estatística t de *Student* é definida multiplicando o denominador da equação (84) pela raiz quadrada positiva da variância à posteriori ($\hat{\sigma}_0$). Se os resíduos diferirem estatisticamente de zero, a observação utilizada para o cálculo da estatística é detectada como um *outlier*.

As hipóteses nula e alternativa são iguais a:

$$H_0 : v_i = 0 \quad (81)$$

$$H_a : v_i \neq 0 \quad (82)$$

A estatística sugerida por Baarda (1968) apud Ghilani (2010) é:

$$t_i = \frac{v_i}{\hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_{ii}}} = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \quad (83)$$

A definição do nível de rejeição é dada pela distribuição t de *Student* bicaudal com (gl) graus de liberdade e é dado por (GOUDARZI;COCARD; SANTERRE, 2014):

$$\frac{|v_i|}{\hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_{ii}}} > t_{\alpha/2}, (gl) \quad (84)$$

A observação que tiver valor absoluto de (t_i) maior do que a tolerância estabelecida ($t_{\alpha/2}, (gl)$) será detectada como *outlier*.

¹⁷Baarda (1968) apud Ghilani (2010) calculou o critério de rejeição para vários níveis de significância e para $\alpha = 5\%$ e $\beta = 80\%$ e obteve o valor 2,8.

O teste *Data Snooping* só é confiável quando se tem um bom conhecimento das propriedades estocásticas das observações (GHILANI, 2010).

¹⁷ BAARDA, W. **A testing procedure for use in geodetic networks**. Publications in Geodesy, New Series, vol. (5), Netherlands Geodetic Commission, 1968.

3.2.4 Modelagem matemática para estimação dos 14 parâmetros de transformação entre referenciais

A modelagem matemática e os procedimentos adotados para estimação dos 14 parâmetros da transformação de Helmert são apresentados tomando-se como referência Gregorius (1996), Boucher et al. (2004) e Petit e Luzum (2010). Ressalta-se que os parâmetros estimados nesta seção foram avaliados de modos interno e externo (seção 7.1) e foram comparados com os parâmetros empregados no IBGE-PPP e fornecidos pelo IERS.

Os modelos matemáticos expressos pelas equações (85) e (86) foram empregados nas formas direta e inversa. Na forma direta, as coordenadas em um referencial específico são transformadas para um referencial de interesse. Na forma inversa, as equações de observação são formuladas com base nas coordenadas dos pontos comuns em ambos os sistemas de referência de modo que seja possível a estimação dos parâmetros da transformação de Helmert.

Devido a superabundância de estações com coordenadas e velocidades conhecidas nos dois referenciais, pôde-se empregar o modelo paramétrico de ajustamento na estimação dos parâmetros de transformação e suas variações temporais. Os modelos matemáticos (85) e (86) permitem a mudança de referencial das coordenadas e velocidades de um referencial origem para um referencial destino.

$$\begin{aligned}x_d &= x_0 + t_x + D \cdot x_0 - r_z \cdot y_0 + r_y \cdot z_0 \\y_d &= y_0 + t_y + r_z \cdot x_0 + D \cdot y_0 - r_x \cdot z_0 \\z_d &= z_0 + t_z - r_y \cdot x_0 + r_x \cdot y_0 + D \cdot z_0\end{aligned}\tag{85}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_x^d &= \mathbf{v}_x^o + \dot{t}_x + \dot{D} \cdot x_0 - \dot{r}_z \cdot y_0 + \dot{r}_y \cdot z_0 \\ \mathbf{v}_y^d &= \mathbf{v}_y^o + \dot{t}_y + \dot{r}_z \cdot x_0 + \dot{D} \cdot y_0 - \dot{r}_x \cdot z_0 \\ \mathbf{v}_z^d &= \mathbf{v}_z^o + \dot{t}_z - \dot{r}_y \cdot x_0 + \dot{r}_x \cdot y_0 + \dot{D} \cdot z_0\end{aligned}\tag{86}$$

Para cada estação são geradas seis equações de observação e tem-se 14 parâmetros incógnitos. Colocando as equações (85) e (86) na forma (56) tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \vec{L}_{\bar{x}} \\ \vec{L}_{\bar{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\bar{x}} & 0 \\ A_{\bar{v}} & A_{\bar{x}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \dot{P} \end{bmatrix}\tag{87}$$

$$\begin{bmatrix} x_d - x_o \\ y_d - y_o \\ z_d - z_o \\ v_x^d - v_x^o \\ v_y^d - v_y^o \\ v_z^d - v_z^o \end{bmatrix}_{6,n \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 & 0 & z_0 & -y_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 & -z_0 & 0 & x_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 & y_0 & -x_0 & 0 \\ \approx [0]_{3 \times 6} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0]_{3 \times 6} & & & & & & \\ & 1 & 0 & 0 & x_0 & 0 & z_0 & -y_0 \\ & 0 & 1 & 0 & y_0 & -z_0 & 0 & x_0 \\ & 0 & 0 & 1 & z_0 & y_0 & -x_0 & 0 \end{bmatrix}_{6,n \times 14} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ D \\ r_x \\ r_y \\ r_z \\ \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \\ \dot{D} \\ \dot{r}_x \\ \dot{r}_y \\ \dot{r}_z \end{bmatrix}_{14 \times 1}$$

(88)

Sendo:

$$\vec{L}_{\vec{X}_i} = \begin{bmatrix} x_d - x_o \\ y_d - y_o \\ z_d - z_o \end{bmatrix}; \vec{L}_{\vec{V}_i} = \begin{bmatrix} v_x^d - v_x^o \\ v_y^d - v_y^o \\ v_z^d - v_z^o \end{bmatrix}; A_{\vec{X}_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 & 0 & z_0 & -y_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 & -z_0 & 0 & x_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 & y_0 & -x_0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$; P = \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z & D & r_x & r_y & r_z \end{bmatrix}^T; \dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{t}_x & \dot{t}_y & \dot{t}_z & \dot{D} & \dot{r}_x & \dot{r}_y & \dot{r}_z \end{bmatrix}^T.$$

$$A_{\vec{V}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & v_x^o & 0 & v_z^o & -v_y^o \\ 0 & 0 & 0 & v_y^o & -v_z^o & 0 & v_x^o \\ 0 & 0 & 0 & v_z^o & v_y^o & -v_x^o & 0 \end{bmatrix}. \quad A_{\vec{V}} \approx 0 \quad (\text{PETIT; LUZUM, 2010}). \quad \text{Na}$$

programação foi considerado os valores de $A_{\vec{V}}$ iguais à zero.

Onde:

$\vec{L}_{\vec{X}_i}$: diferença das coordenadas das estações nos dois referenciais; $\vec{L}_{\vec{V}_i}$: diferença das velocidades das estações nos dois referenciais; $A_{\vec{X}_i}$: obtida pela derivada parcial da equação (85) em relação aos parâmetros de transformação; P : parâmetros de transformação; e $\dot{P}$: variações temporais dos parâmetros.

Os 14 parâmetros da transformação de Helmert estão contidos no vetor ($\vec{X}_a$):

$$X_a = \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z & D & r_x & r_y & r_z & \dot{t}_x & \dot{t}_y & \dot{t}_z & \dot{D} & \dot{r}_x & \dot{r}_y & \dot{r}_z \end{bmatrix}^T \quad (89)$$

As rotações e respectivas variações temporais são normalmente disponibilizadas, respectivamente, em miliarcossegundo (mas) e miliarcossegundo por ano (mas/ano). O fator de escala e variação temporal são dadas em partes por bilhão (ppb)

e partes por bilhão por ano (ppb/ano). As translações e variações temporais são dadas em metros (m) e metros por ano (m/ano).

A matriz (A) para cada estação é obtida da derivada parcial das seis equações de observação (85) e (86) em relação aos 14 parâmetros de transformação é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} A_{\bar{x}} & 0 \\ \approx 0 & A_{\bar{v}} \end{bmatrix}_{6 \times 14} \quad (90)$$

A MVC das observações é bloco diagonal e é dada por:

$$\Sigma_{\Delta} = \text{diag} \left\{ \begin{bmatrix} \left(\Sigma_{\bar{x}_d} + \Sigma_{\bar{x}_o} \right)_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} \\ [0]_{3 \times 3} & \left(\Sigma_{\bar{v}_d} + \Sigma_{\bar{v}_o} \right)_{3 \times 3} \end{bmatrix} \right\}_{6 \times n \times 6 \times n} \quad (91)$$

Sendo: n o número de estações.

A matriz dos pesos (P) é dada por:

$$P_{6 \times n \times 6 \times n} = \sigma_0^2 \cdot \Sigma_{\Delta}^{-1} \quad (92)$$

Neste trabalho, optou-se por realizar a estimação dos parâmetros com uso da matriz dos pesos igual a identidade, ou seja, as observações possuem mesmo peso, pois o uso das precisões das coordenadas e velocidades fez com que N não tivesse inversa ordinária. Isto implica no emprego de injunção para retirar a deficiência de posto. A matriz identidade para o peso é uma das possibilidades para essa matriz conforme diz Boucher et al. (2004).

O vetor dos parâmetros ajustados

$$\bar{X}_a = \left(A^T \cdot P \cdot A \right)^{-1} A^T \cdot P \cdot \bar{L}_b \quad (93)$$

O vetor dos resíduos é dado por:

$$\vec{R} = A \cdot \bar{X}_a - \bar{L}_b \quad (94)$$

A variância *a posteriori* e a MVC dos parâmetros ajustados pode ser obtida por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\vec{R}^T \cdot P \cdot \vec{R}}{6 \cdot n - 14} \quad (95)$$

Onde:

n: número de estações utilizadas;

A MVC dos parâmetros ajustados é dada por:

$$\Sigma_{\bar{X}_a} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot \left(A^T \cdot P \cdot A \right)^{-1} \quad (96)$$

3.2.5 Estimação das coordenadas do polo de Euler e vetor velocidade angular para a placa SOAM

As velocidades e coordenadas no ITRF2008 de estações selecionadas da RBMC obtidas da solução multianual foram empregadas na estimação das componentes cartesianas do vetor velocidade angular da placa SOAM.

A determinação das velocidades cartesianas geocêntricas das estações é realizada com base nas componentes cartesianas do vetor velocidade angular e das coordenadas cartesianas geocêntricas das estações de interesse conforme apresenta o modelo matemático (97) (SOUZA, 2013; SOUZA; GARNÉS, 2014; GOUDARZI; COCARD; SANTERRE, 2014):

$$\begin{aligned} V_x &= z \cdot \omega_x - y \cdot \omega_z \\ V_y &= -z \cdot \omega_x + x \cdot \omega_z \\ V_z &= y \cdot \omega_x - x \cdot \omega_y \end{aligned} \quad (97)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_a = \begin{bmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_a \quad (98)$$

Com base no conhecimento das velocidades, coordenadas e respectivas precisões foi possível por meio de ajustamento por mínimos quadrados estimar as componentes do vetor velocidade angular (parâmetros). No ajustamento, há três parâmetros ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) e cada estação contribui com três equações de observação. Assim, o grau de liberdade é dado por ($gl = 3 \cdot n - u$), onde n é o número de estações e u o número de parâmetros.

A equação de observação pode ser escrita seguindo (98) e acrescentando o vetor dos resíduos ($\vec{R}$) como (99):

$$\vec{V} + \vec{R} = A \cdot \vec{\Omega} \quad (99)$$

Sendo:

$\vec{V}$: vetor das observações (velocidades); $\vec{R}$: vetor dos resíduos das observações; A : matriz dos coeficientes; $\vec{\Omega}$: vetor dos parâmetros (vetor das componentes cartesianas da velocidade angular da placa).

Substituindo as componentes de cada vetor e matriz na equação (99) para cada estação, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}_{3 \times 1} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (100)$$

Os resíduos colocados em evidência para a equação (100) e generalizando para n estações tem-se:

$$\vec{R} = A \cdot \vec{\Omega} - \vec{V} \quad (101)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \vdots \\ v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{3 \cdot n \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{bmatrix}_{3 \cdot n \times 3} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{3 \times 1} - \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \vdots \\ v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{3 \cdot n \times 1} \quad (102)$$

Sendo:

$$R = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \vdots \\ v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{3 \cdot n \times 1}; A = \begin{bmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{bmatrix}_{3 \cdot n \times 3}; V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \vdots \\ V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}_{3 \cdot n \times 1}; \Omega = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{3 \times 1}.$$

A MVC das velocidades é bloco diagonal, sendo dada por:

$$\Sigma_V = \begin{bmatrix} \sigma_{v_x}^2 & \sigma_{v_x v_y} & \sigma_{v_x v_z} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \sigma_{v_y v_x} & \sigma_{v_y}^2 & \sigma_{v_y v_z} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \sigma_{v_z v_x} & \sigma_{v_z v_y} & \sigma_{v_z}^2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \sigma_{v_x}^2 & \sigma_{v_x v_y} & \sigma_{v_x v_z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \sigma_{v_y v_x} & \sigma_{v_y}^2 & \sigma_{v_y v_z} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_{v_z v_x} & \sigma_{v_z v_y} & \sigma_{v_z}^2 \end{bmatrix}_{3 \cdot n \times 3 \cdot n} \quad (103)$$

A Matriz dos pesos é dada por:

$$P = \sigma_0^2 \cdot \Sigma_V^{-1} \quad (104)$$

O vetor das componentes cartesianas da velocidade angular da placa é dado por:

$$\vec{\Omega}_a = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} A^T \cdot P \cdot \vec{L}_b \quad (105)$$

O vetor dos resíduos das observações (velocidades) é dado por:

$$\vec{R} = A \cdot \vec{\Omega}_a - \vec{V} \quad (106)$$

A variância *a posteriori* é dada por (GOUDARZI, COCARD, SANTERRE, 2014):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\vec{R}^T \cdot P \cdot \vec{R}}{2 \cdot n - u} \quad (107)$$

O sigma *a posteriori* é dado por (GOUDARZI, COCARD, SANTERRE, 2014):

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\vec{R}^T \cdot P \cdot \vec{R}}{2 \cdot n - u}} \quad (108)$$

A MVC dos parâmetros é dada por:

$$\Sigma_{\Omega} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \quad (109)$$

Com base nas componentes cartesianas do vetor velocidade angular calculam-se as coordenadas do polo de Euler e a velocidade angular determinados para a placa tectônica. O modelo matemático para essa finalidade é dado por (GOUDARZI; COCARD; SANTERRE, 2014):

$$\Phi = \arctan\left(\omega_z / \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}\right); \quad (110)$$

$$\Lambda = \arctan\left(\omega_y / \omega_x\right); \quad (111)$$

$$\|\vec{\Omega}\| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}. \quad (112)$$

Deve-se realizar análise de quadrante no cálculo da longitude.

A MVC das coordenadas do polo de Euler e da velocidade angular da placa pode ser obtida via propagação de variância com base nas equações (110), (111) e (112). O modelo de propagação de variância é dado por:

$$\Sigma_{\Phi, \Lambda, \Omega} = J \cdot \Sigma_{\omega_x, \omega_y, \omega_z} \cdot J^T \quad (113)$$

Sendo:

$$J = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_x \omega_z}{\|\Omega\|^2 \cdot \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} & -\frac{\omega_y \omega_z}{\|\Omega\|^2 \cdot \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} & \frac{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\|\Omega\|^2} \\ -\frac{\omega_y}{\omega_x^2 + \omega_y^2} & \frac{\omega_x}{\omega_x^2 + \omega_y^2} & 0 \\ \frac{\omega_x}{\|\Omega\|} & \frac{\omega_y}{\|\Omega\|} & \frac{\omega_z}{\|\Omega\|} \end{bmatrix};$$

$$\Sigma_{\omega_x, \omega_y, \omega_z} = \begin{bmatrix} \sigma_{\omega_x}^2 & \sigma_{\omega_x \omega_y} & \sigma_{\omega_x \omega_z} \\ \sigma_{\omega_y \omega_x} & \sigma_{\omega_y}^2 & \sigma_{\omega_y \omega_z} \\ \sigma_{\omega_z \omega_x} & \sigma_{\omega_z \omega_y} & \sigma_{\omega_z}^2 \end{bmatrix}; \Sigma_{\Phi, \Lambda, \Omega} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Phi}^2 & \sigma_{\Phi \Lambda} & \sigma_{\Phi \Omega} \\ \sigma_{\Lambda \Phi} & \sigma_{\Lambda}^2 & \sigma_{\Lambda \Omega} \\ \sigma_{\Omega \Phi} & \sigma_{\Omega \Lambda} & \sigma_{\Omega}^2 \end{bmatrix}_{3 \times 3}.$$

Onde:

J: Matriz jacobiana obtida derivando-se as equações (110) a (112) em relação às componentes cartesianas do vetor velocidade angular; $\Sigma_{\omega_x, \omega_y, \omega_z}$: MVC das componentes da velocidade angular da placa; $\Sigma_{\Phi, \Lambda, \Omega}$: MVC das coordenadas do polo de Euler e velocidade angular da placa.

3.2.6 Estimação dos parâmetros de transformação, época 2000,4, do ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000)

Nesta seção é apresentado o procedimento empregado na estimação dos 14 parâmetros da transformação de Helmert com base, inicialmente, em 58 estações da RBMC, que também pertencem à rede SIRGAS-CON; e que possuem coordenadas e velocidades nos sistemas ITRF2008 (IGb08) e SIRGAS2000 (ITRF2000).

A Figura 35 ilustra as etapas seguidas na obtenção dos parâmetros para transformação do ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000), na época 2000,4.

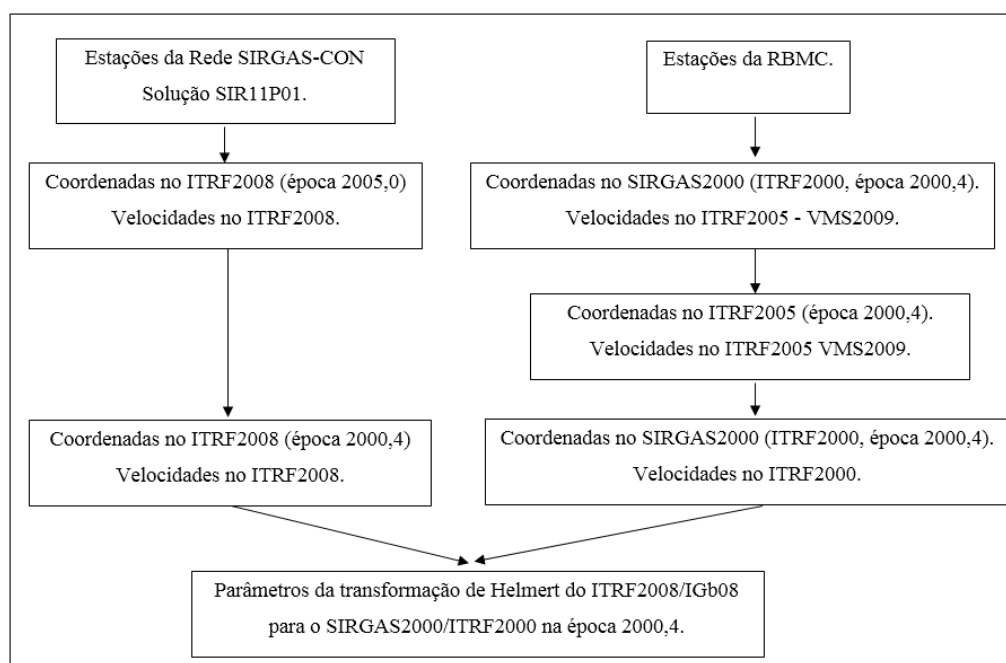


Figura 35 - Fluxograma contendo a metodologia usada para estimação dos parâmetros.

As coordenadas no ITRF2008 provenientes da solução SIR11P01 da rede SIRGAS-CON foram atualizadas da época 2005,0 para a época 2000,4 por meio das velocidades disponibilizadas nessa solução. Esta época de referência foi escolhida para que os parâmetros de transformação do SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) para o ITRF2008 (IGb08, época 2000,4) não precisem ser atualizados. Porém, na transformação das coordenadas do ITRF2008 (IGb08, época 2015,594) para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) realiza-se a atualização dos parâmetros da época 2000,4 para a época 2015,594.

Os parâmetros de transformação do SIRGAS2000 (ITRF2000) para o ITRF2008 (IGb08) foram obtidos invertendo-se o sinal dos parâmetros de transformação do ITRF2008 para o SIRGAS2000 (ITRF2000) estimados no ajustamento.

As velocidades no ITRF2005 das estações da RBMC foram obtidas com base no VEMOS2009 por meio do aplicativo VMS2009 e das coordenadas das estações também nesse referencial. Com base nas coordenadas (época 2000,4) e velocidades das estações no ITRF2005 foi realizada a mudança de referencial das velocidades para o ITRF2000.

Com base nas coordenadas das estações no ITRF2008 e SIRGAS2000 (ITRF2000) na época 2000,4 e das velocidades nesses referenciais, os 14 parâmetros de transformação do ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000) foram estimados.

No procedimento de interpolação implementado, as coordenadas cartesianas geocêntricas de entrada estando em SIRGAS2000 (ITRF2000, época de origem), realiza-se a mudança de referencial das coordenadas desse referencial para o ITRF2005, época de origem. E, com base nessas coordenadas, realiza-se a interpolação das velocidades para a estação de interesse. Com base nas velocidades e coordenadas no ITRF2005, efetua-se a mudança de referencial das velocidades do ITRF2005 para o SIRGAS2000 (ITRF2000). Ressalta-se que o programa VMS2009 não realiza a mudança de referencial das velocidades calculadas com base no gride VEMOS2009.

O inverso da distância estima um valor para uma posição não amostrada como uma média dos dados dentro de uma vizinhança (MIRANDA, 2005). O cálculo da média é ponderado pela distância entre o ponto a ser interpolado e seus vizinhos, de modo que a influência dos valores vizinhos diminui com o aumento da distância do local sendo estimado, ou seja, os pontos amostrados mais próximos do ponto interpolado recebem um peso maior do que os pontos mais distantes.

Na interpolação das velocidades do ponto de interesse foram utilizados, quando disponíveis, quatro vizinhos mais próximos, cujas velocidades cartesianas geocêntricas são conhecidas. Desse modo, fornecidas as coordenadas geodésicas de um ponto, o programa automaticamente enquadra sua posição dentro da grade do VEMOS2009, calcula as distâncias (com base nas coordenadas cartesianas) do ponto de interesse aos vértices que delimitam a quadrícula e determina-se as velocidades cartesianas geocêntricas.

As coordenadas cartesianas dos pontos da quadrícula foram calculadas considerando as altitudes elipsoidais iguais a zero, ou seja, todos os pontos sobre o elipsoide.

Na Figura 37, observa-se quatro vértices da grade do VEMOS2009 cujas velocidades foram utilizadas para determinação das velocidades da estação de interesse (P_i).

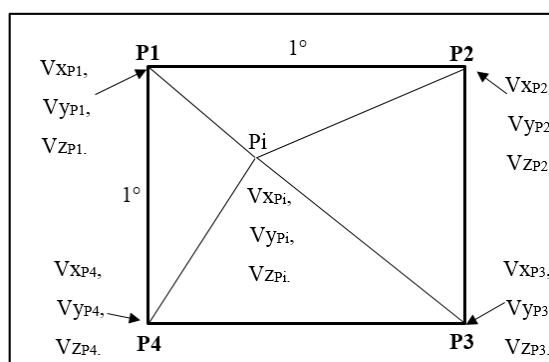


Figura 37 - Esquema empregado na interpolação pelo inverso da distância.

As velocidades cartesianas geocêntricas dos pontos de interesse foram obtidas com o emprego das equações de 54 a 57 (MIRANDA, 2005).

$$V_{x_{p.int.}} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} V_{x_i} \right) / \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right) \quad (114)$$

$$V_{y_{p.int.}} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} V_{y_i} \right) / \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right) \quad (115)$$

$$V_{z_{p.int.}} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} V_{z_i} \right) / \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right) \quad (116)$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{p.int.})^2 + (y_i - y_{p.int.})^2 + (z_i - z_{p.int.})^2} \quad (117)$$

Sendo:

d_i : distâncias espaciais calculadas com base nas coordenadas cartesianas geocêntricas dos pontos; V_{x_i} , V_{y_i} , V_{z_i} : velocidades cartesianas geocêntricas dos vértices da quadrícula a qual o ponto pertence; $V_{x_{p.int.}}$, $V_{y_{p.int.}}$, $V_{z_{p.int.}}$: velocidades cartesianas geocêntricas da estação de interesse; $\frac{1}{d_i}$: é o peso atribuído; e n: número de vértices empregados na interpolação.

No desenvolvimento do algoritmo foi especificado de forma que, quando o ponto de interesse estiver a uma distância menor que um metro de qualquer um dos quatro vértices da quadrícula, as velocidades cartesianas geocêntricas atribuídas a esse ponto serão iguais a desse vértice.

Nos experimentos realizados foi possível perceber que no processo de interpolação existem casos em que não há todos os quatro vértices da grade do VEMOS2009 e, desse modo, o algoritmo utiliza-se de três, dois ou apenas um vértice da grade do para o cálculo da velocidade do ponto de interesse.

Quando as coordenadas dos pontos de interesse estiverem nos referenciais SIRGAS2000 (ITRF2000) ou ITRF2008 (IGb08) essas deverão ser transformadas para o ITRF2005. E, estando as velocidades e coordenadas no ITRF2005, determinam-se as velocidades nos referenciais das coordenadas de origem. De posse das coordenadas e velocidades no mesmo referencial (de origem), realiza-se a mudança de referencial das coordenadas e velocidades para o referencial destino e procede-se a atualização das coordenadas da época (t_0) para outra (t).

Se as coordenadas a serem atualizadas estiverem referenciadas ao ITRF2005, as velocidades empregadas nesse processo são obtidas de forma direta do procedimento de interpolação, ou seja, não é necessário realizar mudança de referencial das velocidades obtidas com a grade de velocidade do VEMOS2009.

A Figura 38 ilustra as etapas seguidas na determinação das velocidades cartesianas geocêntricas nos referenciais ITRF2000, ITRF2005 e ITRF2008 com emprego da grade do VEMOS2009 bem como a atualização das coordenadas.

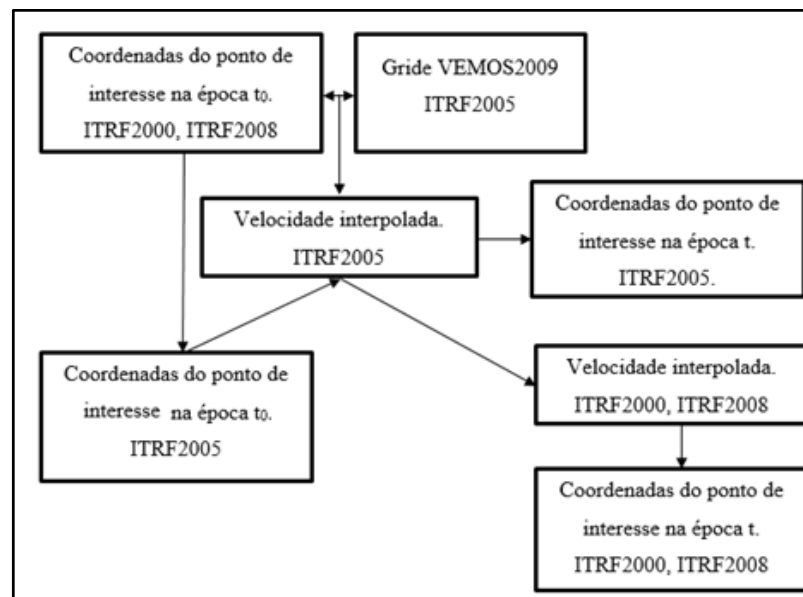


Figura 38 - Etapas para determinação das velocidades nos referenciais desejados dos pontos de interesse.

Na Figura 32, pode-se visualizar que as coordenadas do ponto de interesse são transformadas do ITRF2000 ou ITRF2008 para o ITRF2005. A partir dessas coordenadas e da grade do VEMOS2009, as velocidades no ITRF2005 foram interpoladas. As velocidades podem ser transformadas do ITRF2005 para os ITRF2000 ou ITRF2008 e proceder a atualização das coordenadas nesses referenciais da época (t_0) para a época (t).

3.2.8 Etapas seguidas nos experimentos e cálculos das discrepâncias posicionais

Os processamentos das observáveis GPS no LGO foram executados considerando: arquivo contendo parâmetros de calibração absoluta das antenas, no formato ANTINFO (*Antenna Information Format*, v.3) obtidos no site¹⁸. Neste arquivo,

¹⁸ <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=ngs08.003>

contêm os *offsets* dos centros de fase da antena para as portadoras L1 e L2 (*Phase Center Offset* – PCO) e as variações dos centros de fase das portadoras L1e L2 em função da elevação dos satélites (*Phase Center Variation* - PCV); máscara de elevação de 15 graus; modelo troposférico de *Hopfield* para minimização dos efeitos da troposfera; e para eliminação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera foi utilizada a combinação linear livre dos efeitos da ionosfera.

As coordenadas das estações de controle empregadas no LGO na determinação dos vetores linhas de base são provenientes dos arquivos de observação no formato RINEX. As coordenadas dessas estações advindas de seus descritivos e/ou transformadas e atualizadas foram utilizadas somente no ajustamento injuncionado como parâmetros ponderados (pseudo-observações).

As coordenadas geodésicas curvilíneas foram calculadas com base nas coordenadas cartesianas geocêntricas obtidas do ajustamento injuncionado e empregando-se os parâmetros do elipsoide GRS80. De posse dessas coordenadas, foi possível avaliar as discrepâncias (tendências) em termos de longitude, latitude e planimetria. A conversão das discrepâncias em termos de longitude e latitude dadas em radianos para comprimento de arco (metros) foi realizada por meio do emprego das equações (118) e (119) dadas por (TORGE, 2001).

$$\delta_{\phi_i}^m = \frac{a \cdot (1 - e^2) \cdot (\phi_{est,i}^{rad} - \phi_{ref,i}^{rad})}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi_{média})^{3/2}} \quad (118)$$

$$\delta_{\lambda_i}^m = \frac{a \cdot \cos \phi_{média} \cdot (\lambda_{est,i}^{rad} - \lambda_{ref,i}^{rad})}{\sqrt{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi_{média})}} \quad (119)$$

Onde:

$\phi_{média}$: latitude média calculada com base nos pontos de referência e estimado; $\lambda_{est,i}^{rad}, \phi_{est,i}^{rad}$, $\lambda_{ref,i}^{rad}, \phi_{ref,i}^{rad}$: coordenadas geodésicas curvilíneas estimadas e de referência das estações em radianos; $\delta_{\phi_i}^m$: discrepância para latitude em metros; e $\delta_{\lambda_i}^m$: discrepância para longitude em metros.

As discrepâncias altimétricas, planimétricas e tridimensionais e RMS (*Root Mean Square*) foram calculadas com base nas equações de (120) a (126).

$$\delta h_i = h_{est.} - h_{ref.} \quad (120)$$

$$D2D_{pi} = \sqrt{(\delta_{\phi_i}^m)^2 + (\delta_{\lambda_i}^m)^2} \quad (121)$$

$$D3D_{pi} = \sqrt{(\delta_{\phi i}^m)^2 + (\delta_{\lambda i}^m)^2 + (\delta h_i^m)^2} \quad (122)$$

$$RMS_{\delta_{\phi}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_{\phi i}^m)^2} \quad (123)$$

$$RMS_{\delta_{\lambda}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_{\lambda i}^m)^2} \quad (124)$$

$$RMS_{D2D} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D2D_{pi})^2} \quad (125)$$

$$RMS_{D3D} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D3D_{pi})^2} \quad (126)$$

Onde:

n: número de estações; δh_i , $D2D_{pi}$, $D3D_{pi}$: discrepâncias altimétricas, planimétricas e tridimensionais; $RMS_{\delta_{\phi i}}$, $RMS_{\delta_{\lambda i}}$: RMS das discrepâncias para latitude e longitude; e $RMS_{D2D_{pi}}$, $RMS_{D3D_{pi}}$: RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais

Não foi executado análise de acurácia com base na tendência e precisão neste trabalho, devido ao fato de não ter sido realizado a propagação de variância nas mudanças de referenciais de coordenadas e velocidades, na atualização das coordenadas e parâmetros de transformação. Desse modo, as precisões disponíveis são as mesmas obtidas do posicionamento realizado. Como nem todos os modelos de velocidades possuem as precisões associadas às coordenadas do polo de Euler e vetor velocidade angular ou das componentes do vetor velocidade angular da placa tectônica, optou-se por não realizar a propagação de variância.

As Figuras 39 e 40 ilustram as etapas seguidas na estimação das coordenadas das estações de interesse com base em dois cenários. No cenário 1 não foi realizado compatibilização de referencial e época. No cenário 2 levou-se em consideração a diferença existente entre referenciais e épocas das efemérides precisas e dos referenciais empregados para posicionamento geodésico no Brasil e na Argentina.

A Figura 39 ilustra os procedimentos do cenário 1 para a determinação posicional no transporte de coordenadas e na solução em rede.

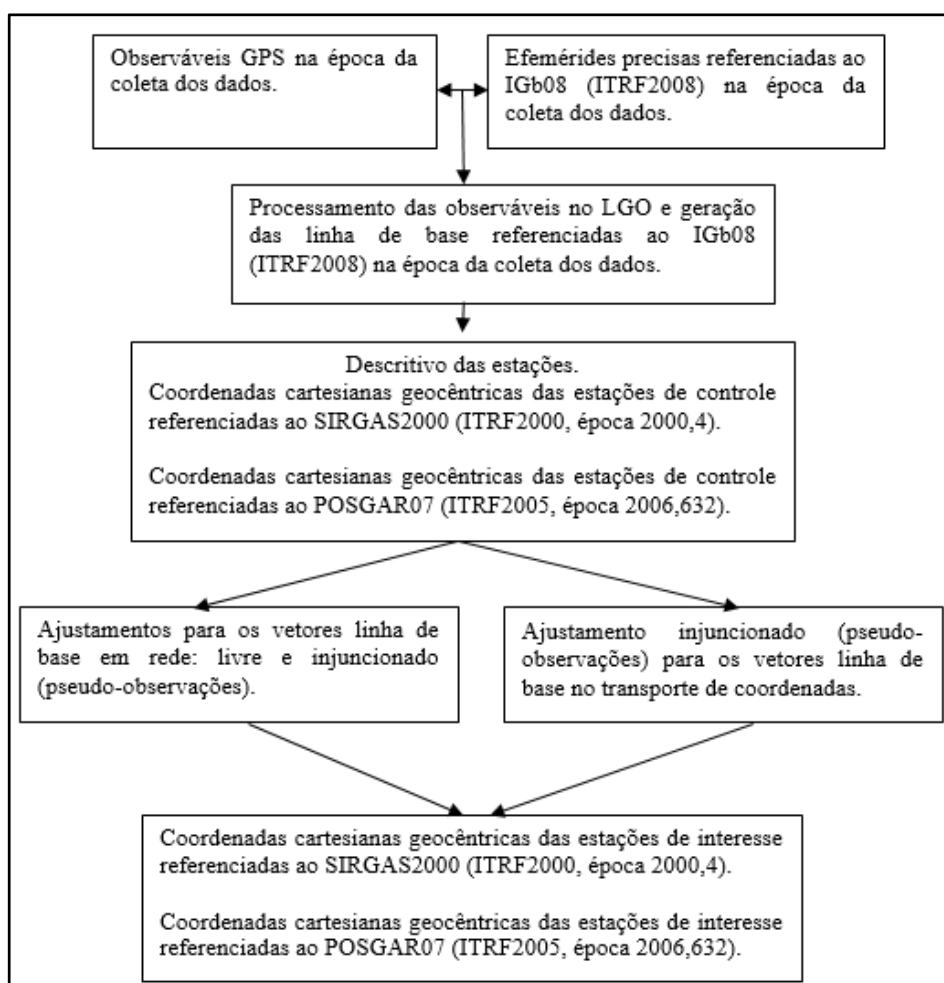


Figura 39 – Procedimentos aplicados no cenário 1 na determinação posicional das estações de interesse.

Nos procedimentos do cenário 1 ilustrados na Figura 39, as coordenadas das estações de controle não são transformadas e atualizadas para o referencial e época das efemérides precisas antes de serem empregadas no ajustamento injuncionado na determinação das coordenadas das estações de interesse. As coordenadas estimadas nesse procedimento são consideradas estarem no referencial oficial de cada País e desconsideram-se os efeitos do deslocamento das estações devido ao movimento da placa tectônica e da diferença de referencial das coordenadas das estações de controle e das efemérides precisas.

A Figura 40 ilustra o procedimento adotado no cenário 2 para a determinação posicional no transporte de coordenadas e na solução em rede.

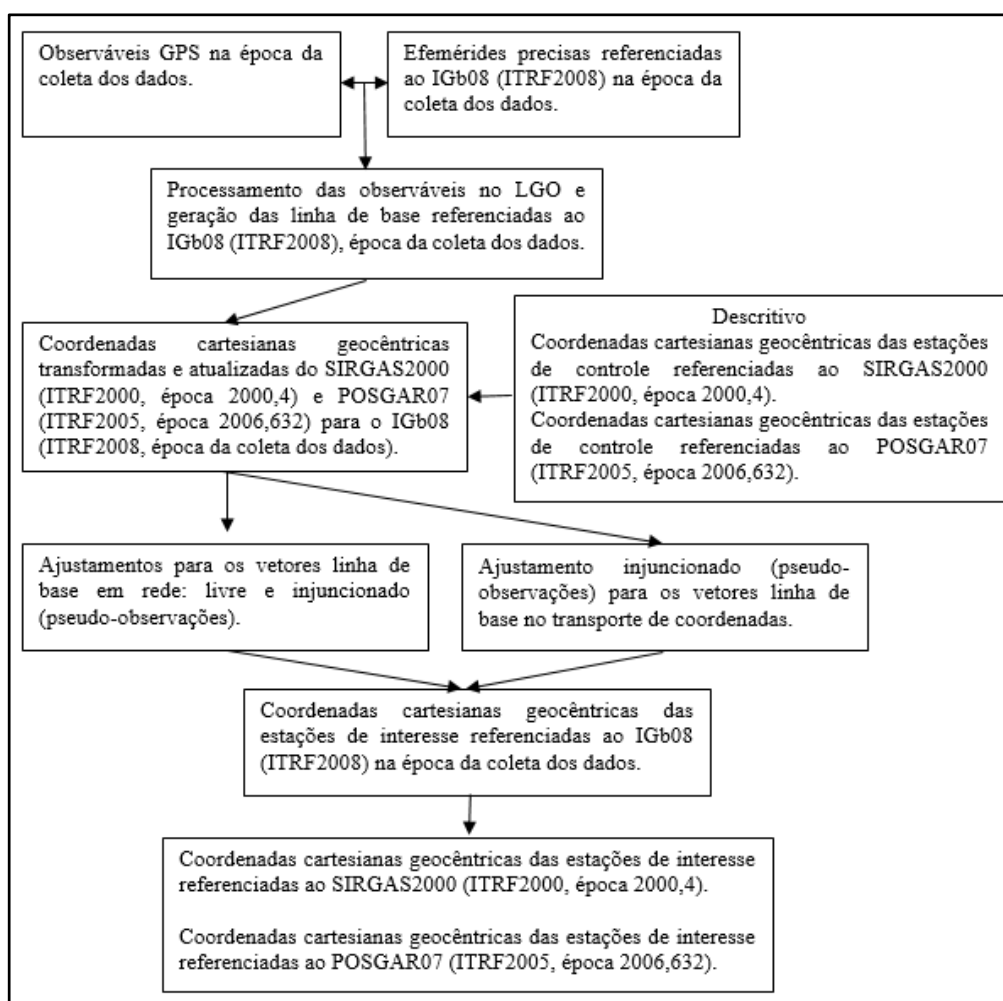


Figura 40 – Procedimentos aplicado no cenário 2 na determinação posicional das estações de interesse.

As Figuras 39 e 40 ilustram que as coordenadas das estações de interesse estimadas no transporte de coordenadas foram obtidas com base no ajustamento injuncionado nos cenários 1 e 2. Na solução em rede, os ajustamentos livre e injuncionado foram realizados nos dois cenários.

Nos procedimentos do cenário 2 ilustrados na Figura 40, as coordenadas das estações de controle são transformadas e atualizadas dos referenciais oficiais adotados em cada País para o referencial e época das efemérides precisas antes de serem empregadas no ajustamento injuncionado.

A mudança de referencial das coordenadas de POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) e SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) para o ITRF2008 (IGb08) são realizados com o emprego dos 14 parâmetros da transformação de Helmert disponibilizados pelo IERS nos experimentos de 2 a 5. O procedimento matemático para mudança de referencial das coordenadas e velocidades das estações foi descrito na seção 2.2. Os parâmetros de transformação do IERS, Tabela 1, empregados na transformação

das coordenadas do ITRF2005 e do ITRF2000 para o ITRF2008 estão na época 2000,0 e foram atualizados para as épocas de referência das coordenadas nos sistemas de referência origem. No posicionamento na Argentina, deve-se atualizar esses parâmetros da época 2000,0 para a época 2006,632 e só então utilizá-los para transformação das coordenadas. No Brasil, deve-se atualizar os parâmetros da época 2000,0 para a época 2000,4 e só então empregá-los na mudança de referencial das coordenadas.

A atualização das coordenadas foi realizada considerando as velocidades calculadas com base nos 19 modelos de velocidade para a placa SOAM implementados no programa GEO_TRANSF_REF_ATUALI.

As coordenadas das estações de interesse estimadas no ajustamento injuncionado estavam no ITRF2008 (IGb08, época da coleta dos dados) e foram transformadas e atualizadas para o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) e SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4).

O emprego das coordenadas das estações na mesma época nos referenciais ITRF2000 (SIRGAS2000), ITRF2005 e ITRF2008 (IGb08) na determinação das velocidades com base em modelos de movimento proporcionam os mesmos valores. Esse fato se justifica pela proximidade posicional em ambos referenciais e pela incerteza modelo de velocidade.

Conforme mencionado anteriormente, foram estimados também, como no âmbito desta pesquisa, os 14 parâmetros da transformação do ITRF2008 (IGb08) para SIRGAS20000 (ITRF2000) e vice-versa bem como as coordenadas do polo de Euler e velocidade angular da placa SOAM. A partir da transformação e atualização das coordenadas do IGb08 (ITRF2008, época selecionada) para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) com base nos PT_Carvalho e MV_Carvalho de algumas estações das redes RBMC/SIRGAS-CON foi possível avaliar a qualidade do posicionamento.

A mudança de referencial dessas coordenadas foram também realizadas com o emprego dos parâmetros de transformação do IBGE-PPP e IERS para fins de comparação. A atualização das coordenadas foram realizadas com base no uso de 19 modelos de movimento para a placa SOAM.

A automatização dos cálculos foi realizada pelo aplicativo GEO_TRANSF_REF_ATUALI desenvolvido e sua tela é apresentada na Figura 41.

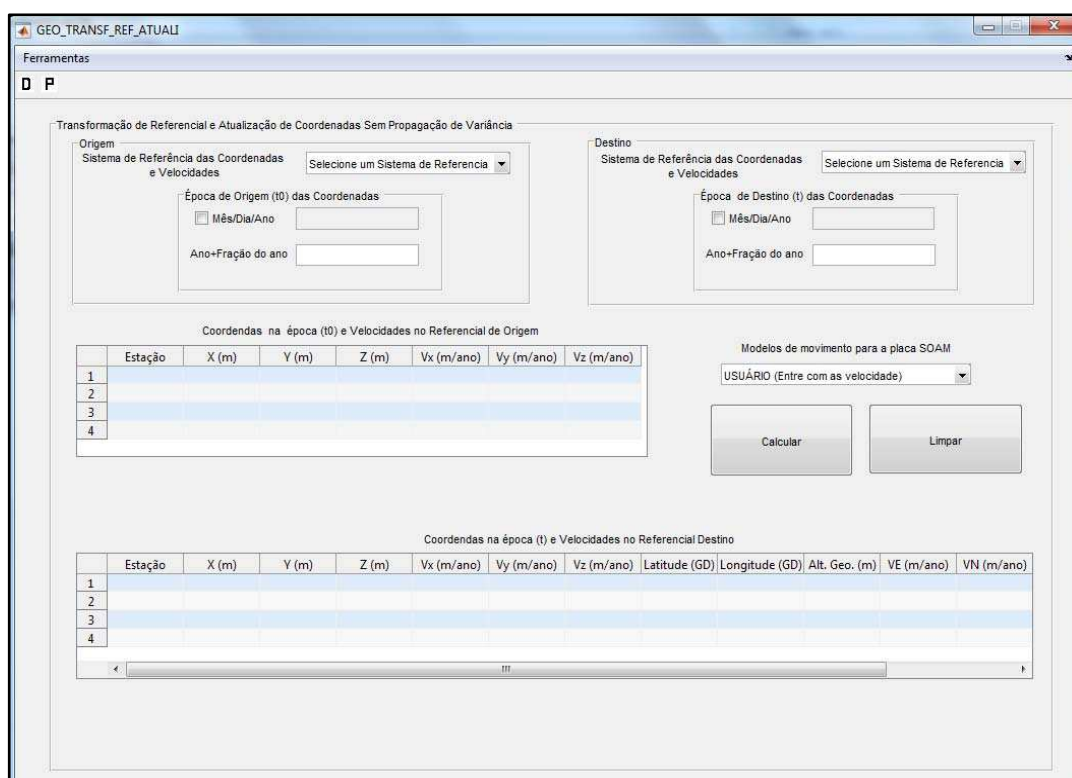


Figura 41- Tela do aplicativo empregado na mudança de referencial e atualização.

O aplicativo desenvolvido ilustrado na Figura 41 dispõe das seguintes funcionalidades:

- Atualização das coordenadas com base na escolha de diferentes modelos de velocidades para placa Sul-Americana (SOAM);
- Mudança de referencial das coordenadas do entre as realizações ITRF2008, ITRF2005 e ITRF2000; do ITRF (IGb08) para o SIRGAS2000 (IBGE) e vice-versa; e do ITRF2008(IGb08) para SIRGAS2000 (ITRF2000) com base nos PT_Carvalho e vice-versa;
- Mudança de referencial das velocidades entre as realizações ITRF2008, ITRF2005 e ITRF2000; e
- Mudança de referencial das coordenadas e velocidades e atualização das coordenadas.

Ressalta-se que, além da implementação do aplicativo GEO_TRANSF_REF_ATUALI, foram desenvolvidos *scripts* em ambiente Matlab para realização do ajustamento livre, injuncionado e aplicação de testes estatísticos como qui-quadrado e *data snooping*; estimação dos 14 parâmetros da transformação de Helmert e das componentes do vetor velocidade angular da placa SOAM; e as discrepâncias planimétricas com base nas coordenadas geodésicas (latitude e longitude).

4 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Para atingir os objetivos desta pesquisa foram executados cinco experimentos. No experimento 1, foram realizadas validações interna e externa dos parâmetros de transformação estimados nesse trabalho os quais foram denominados de PT_Carvalho; e comparação dos resultados obtidos com os parâmetros PT_Carvalho, IERS e IBGE-PPP em conjunto com 19 modelos de velocidade (ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, APKIM2005D, APKIM2008D, NNR-MORVEL56, Costa, Santos e Gemaél (2003), Perez, Monico e Chaves (2003), Souza e Garnés (2014), Souza (2013), MV_Carvalho, Grade_VEMOS2009, VEMOS2014, GSRM_v.2.1, GEODVEL2010, SOPAC2004, REVEL2000, NNR-NUVEL1A e PB2002).

No experimento 2, sete transportes de coordenadas com o emprego de duas estações de controle e uma estação de interesse foram realizados em áreas localizadas no Brasil e na Argentina. Neste experimento, foi executado também a transformação e atualização das coordenadas de 28 estações da rede RAMSAC/SIRGAS-CON com uso dos parâmetros de transformação do IERS e de 19 modelos de velocidade com intuito de verificar os efeitos desses modelos na qualidade do posicionamento.

No experimento 3, foram construídas duas redes com 9 estações cada (6 estações de interesse e 3 de controle), onde uma está localizada no Brasil (Figura 61) e outra na Argentina (Figura 62). Em cada rede, há 15 linhas de base independentes provenientes de duas e três sessões de observação.

No experimento 4, empregam-se as mesmas linha de base que ligam as estações das redes do experimento 3. A estação 25MA da rede localizada na Argentina foi considerada no ajustamento como estação de interesse, pois não possui coordenadas na solução semanal da rede SIRGAS-CON. Portanto, no ajustamento injuncionado dos vetores linhas de base dessa rede foram consideradas duas estações de controle. Não houve modificação na rede localizada no Brasil. O diferencial deste experimento em relação ao experimento 3 é que neste, as coordenadas das estações de controle referenciadas ao IGB08 (ITR2008, época 2015,594) são provenientes da solução semanal da rede SIRGAS-CON¹⁹. Assim, não foi necessário realizar o mudança de referencial das coordenadas estações de controle nos dois países para o referencial e época das efemérides precisas utilizadas no processamento.

¹⁹ <http://www.sirgas.org/index.php?id=153>

No experimento 5, foi empregado o serviço online AUSPOS para a determinação posicional de seis (6) estações que fazem parte das redes do experimento 3. Ressalta-se que o AUSPOS realiza o processamento no modo relativo com solução em rede e fornece as coordenadas das estações referenciadas ao IGB08 (ITRF2008, na época da coleta dos dados).

A Figura 42 ilustra as etapas seguidas na determinação das coordenadas das estações de interesse nos experimentos 2, 3 e 4 nos cenários 1 (Fig. 39) e 2 (Fig.40).

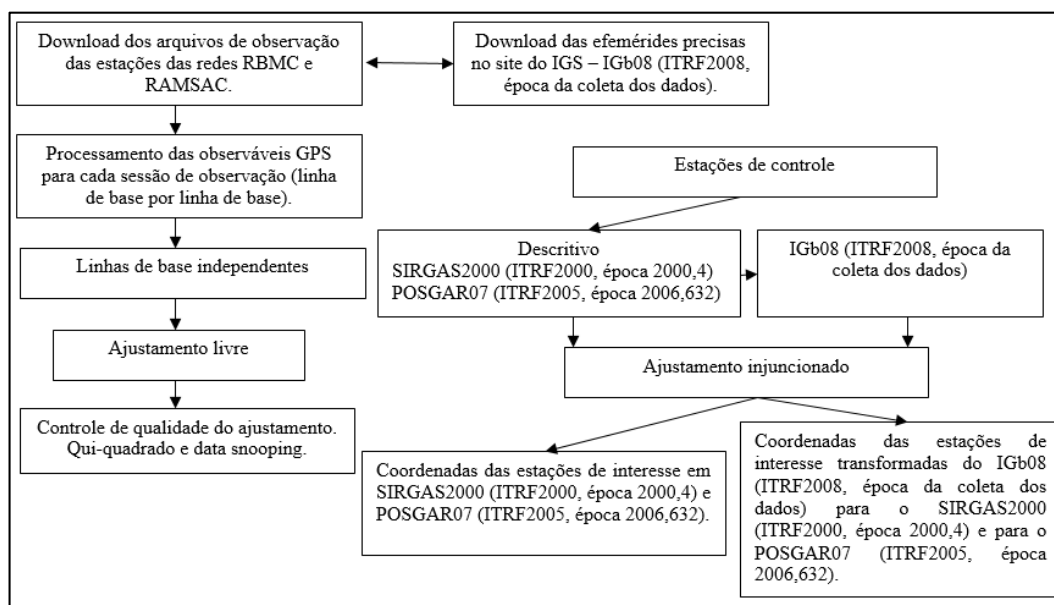


Figura 42 - Procedimentos adotados na execução dos experimentos 2, 3 e 4.

Os cinco experimentos, resultados e análises são apresentados detalhadamente nas seções seguintes.

4.1 Experimento 1

Neste experimento foram realizadas validações interna e externa dos parâmetros de transformação estimados neste trabalho (PT_Carvalho). A validação interna foi realizada comparando as coordenadas transformadas do ITRF2008 (época 2005,0) para o SIRGAS2000 (época 2000,4) das 58 estações empregadas na estimação dos parâmetros PT_Carvalho.

A validação externa foi realizada com base na transformação das coordenadas do IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) de 36 estações que não participaram no procedimento de estimação dos parâmetros

PT_Carvalho. A atualização das coordenadas foi realizada com uso de 19 modelos de velocidade para a placa SOAM.

Com o intuito de comparar os parâmetros de transformação PT_Carvalho com os disponibilizados pelo IERS e IBGE-PPP, as coordenadas provenientes da solução semanal da rede SIRGAS-CON das estações referenciadas ao IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) empregadas na validação externa foram transformadas para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2015,594) e atualizados para a época 2000,4, com base nos modelos de velocidade para a placa SOAM. Portanto, pôde-se avaliar o desempenho dos diferentes parâmetros de transformação e modelos de velocidades. Salienta-se que as coordenadas transformadas e atualizadas para SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) foram comparadas com as presentes nos descritivos das estações selecionadas.

As coordenadas referenciadas ao IGB08 (ITRF2008, época 2015,6) poderiam ter sido determinadas por serviços de posicionamento por ponto preciso, relativos ou diferenciais disponíveis online, tais como: IBGE-PPP²⁰, APPS²¹, GAPS²², CSRS-PPP²³, AUSPOS²⁴, OPUS²⁵, SCOUT²⁶, RT_PPP Online - Posicionamento por Ponto Preciso com dados GPS²⁷, entre outros.

Ressalta-se que embora o modelo VEMOS2009 e as velocidades ITRF2008 disponibilizadas na solução SIR11P011 da rede SIRGAS-CON tenham sido empregados na estimação dos parâmetros, foram utilizados outros 18 modelos no cálculo das velocidades das estações de modo que fosse possível a verificação de qual modelo de velocidade em conjunto com os parâmetros de transformação forneceria as menores discrepâncias posicionais planimétricas (resultantes planimétricas).

4.1.1 Resultados e análise.

Na Tabela 34 encontram-se os 14 parâmetros de transformação do ITRF2008 (IGB08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000), na época 2000,4, e respectivas precisões (desvios padrão) estimadas, conforme apresentado na seção 4.

²⁰ <http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>

²¹ <http://apps.gdgps.net/>

²² <http://gaps.gge.unb.ca/Publications.html>

²³ <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp>

²⁴ <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>

²⁵ <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>

²⁶ <http://sopac.ucsd.edu/scout.shtml>

²⁷ <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/ppp/index>

Tabela 34 - Parâmetros de transformação do ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000), na época 2000,4.

Parâmetros	t_x (m)	t_y (m)	t_z (m)	D (ppb)	r_x (mas)	r_y (mas)	r_z (mas)
	0,0227	0,0032	-0,0209	1,56	-0,191	-0,128	-0,904
$\pm$	0,0088	0,0084	0,0097	1,10	0,289	0,270	0,316
Variações temporais	$\dot{t}_x$ (m/ano)	$\dot{t}_y$ (m/ano)	$\dot{t}_z$ (m/ano)	$\dot{D}$ (ppb/ano)	$\dot{r}_x$ (mas/ano)	$\dot{r}_y$ (mas/ano)	$\dot{r}_z$ (mas/ano)
	0,0011	0,0011	-0,0046	-0,32	-0,071	-0,045	-0,047
$\pm$	0,0088	0,0084	0,0097	1,10	0,289	0,270	0,316

A validação interna dos parâmetros de transformação apresentados na Tabela 33 foi realizada com base nas discrepâncias posicionais. Após transformação e atualização das coordenadas das 58 estações do ITRF2008 (IGb08) época 2005,0 para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) foram realizadas comparações dessas coordenadas com as presentes nos descritivos dessas estações em SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4). É importante frisar que a atualização das coordenadas no ITRF2008 da época 2005,0 para a época 2000,4 foi realizada com base nas velocidades referenciadas ao ITRF2008, provenientes da solução multianual da rede SIRGAS-CON, as quais foram empregadas na estimação dos parâmetros.

A Figura 43 ilustra as discrepâncias em termos de latitude, longitude e altitude elipsoidal para todas as estações que participaram na estimação dos PT_Carvalho. Essas discrepâncias foram obtidas comparando as coordenadas transformadas do ITRF2008 (época 2005,0) para SIRGAS2000 (época 2000,4) com coordenadas dessas estações referenciadas ao SIRGAS2000 (época 2000,4) empregadas na estimação dos PT_Carvalho.

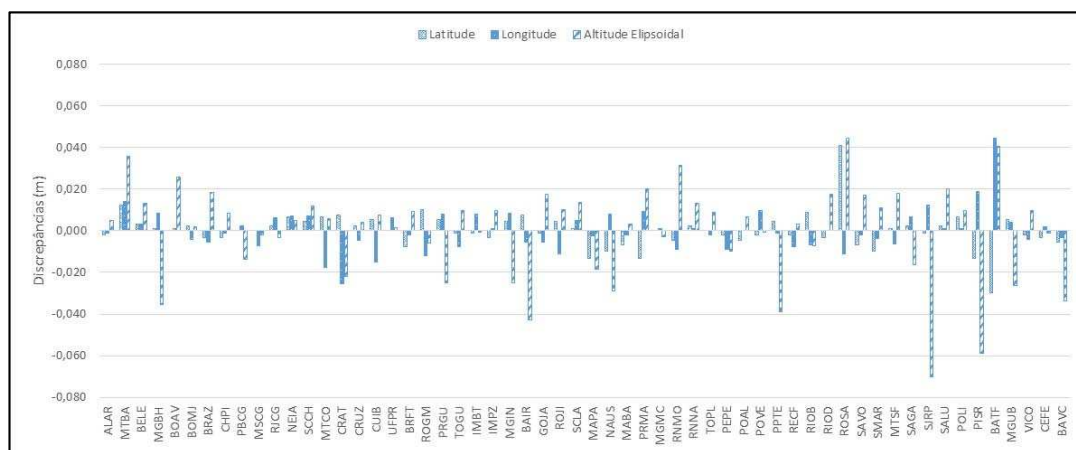


Figura 43 - Discrepâncias para as latitudes, longitudes e altitude elipsoidal.

A Figura 44 ilustra as discrepâncias planimétricas e tridimensionais obtidas nas estações.

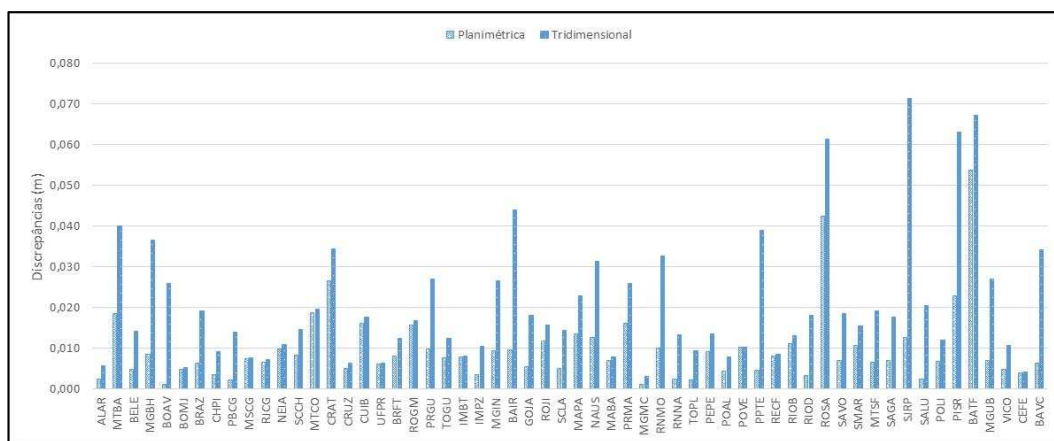


Figura 44 - Discrepâncias planimétricas e tridimensionais.

Na Tabela 34, encontram-se algumas estatísticas para as discrepâncias posicionais das 58 estações obtidas com base na transformação de suas coordenadas do ITRF2008/IGb08 (2005,0) para SIRGAS2000/ITRF2000 (2000,4) com o emprego dos parâmetros PT_Carvalho.

Tabela 35 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais.

Estatísticas	$\delta\phi$ (m)	$\delta\lambda$ (m)	δh (m)	D2D (m)	D3D (m)
Média	0,000	0,000	0,000	0,010	0,021
Mediana	0,000	-0,001	0,005	0,007	0,016
Máximo	0,041	0,045	0,044	0,054	0,071
Mínimo	-0,030	-0,025	-0,070	0,001	0,003
RMS	0,009	0,010	0,022	0,013	0,026

Após verificação das magnitudes das discrepâncias obtidas (Figura 44) foram calculados os desvios padrão para latitude, longitude e altitude elipsoidal e, com base no critério de três vezes o desvio padrão, foi estabelecido que as discrepâncias para latitude, longitude e altitude elipsoidal que fossem maiores do que três centímetros seriam retiradas do procedimento de estimação dos parâmetros de transformação. Dez estações foram eliminadas (MTBA, MGBH, BAIR, RNMO, PPTE, ROSA, SJRP, PISR, BATF e BAVC) e novos parâmetros de transformação foram estimados.

Na Tabela 36, encontram-se os 14 parâmetros de transformação do ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000), na época 2000,4, e respectivas precisões (desvios padrão) obtidas após eliminação das 10 estações e reajustamento.

Tabela 36 - Parâmetros de transformação, suas variações e respectivas precisões.

Parâmetros	t_x (m)	t_y (m)	t_z (m)	D (ppb)	r_x (mas)	r_y (mas)	r_z (mas)
	0,0147	-0,0027	-0,0182	1,354	-0,152	-0,068	-0,520
$\pm$	0,0059	0,0054	0,0063	0,719	0,188	0,178	0,209
Variações temporais	$\dot{t}_x$ (m/ano)	$\dot{t}_y$ (m/ano)	$\dot{t}_z$ (m/ano)	$\dot{D}$ (ppb/ano)	$\dot{r}_x$ (mas/ano)	$\dot{r}_y$ (mas/ano)	$\dot{r}_z$ (mas/ano)
	0,0022	0,0018	-0,0050	-0,312	-0,078	-0,054	-0,095
$\pm$	0,0059	0,0054	0,0063	0,719	0,188	0,178	0,209

Na implementação dos algoritmos de transformação foram consideradas 16 casas decimais dos parâmetros presentes na Tabela 36.

A Figura 45 ilustra as discrepâncias das coordenadas geodésicas obtidas da transformação do ITRF2008 (época 2005,0) para o SIRGAS2000 (época 2000,4) com base nos parâmetros estimados disponíveis na Tabela 35.

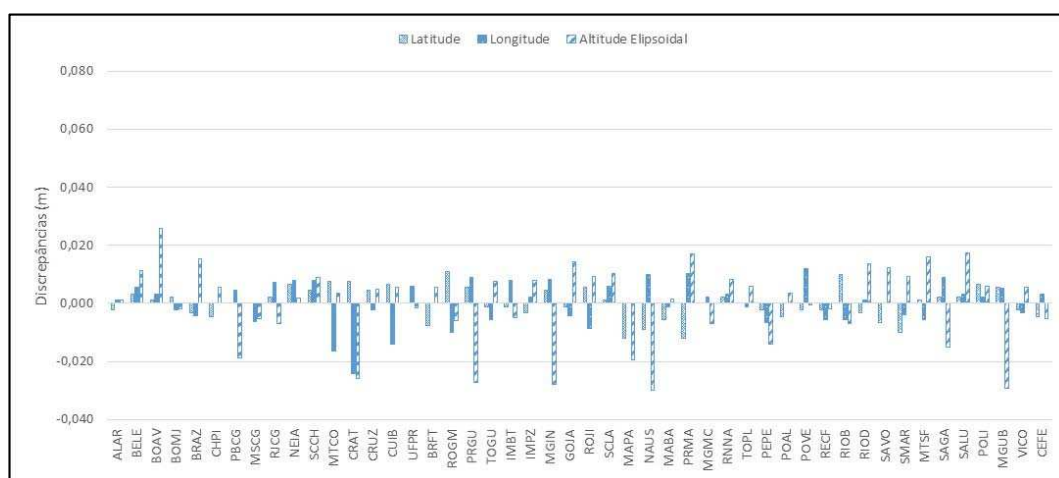


Figura 45 - Discrepâncias para as latitudes, longitudes e altitude elipsoidal.

A Figura 46 ilustra as discrepâncias planimétricas e tridimensionais.

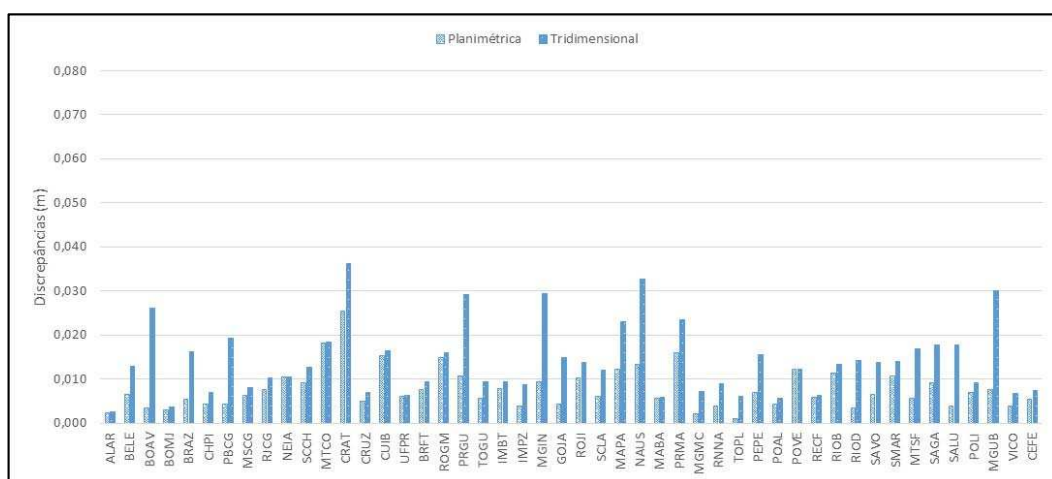


Figura 46 - Discrepâncias planimétricas e tridimensionais.

Na Tabela 37, encontram-se algumas medidas estatísticas para as discrepâncias posicionais das 48 estações (validação interna).

Tabela 37 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais.

Estatísticas	$\delta\phi$ (m)	$\delta\lambda$ (m)	δh (m)	D2D (m)	D3D (m)
Média	0,000	0,000	0,000	0,008	0,014
Mediana	0,000	0,001	0,004	0,006	0,012
Máximo	0,011	0,012	0,026	0,026	0,036
Mínimo	-0,012	-0,024	-0,030	0,001	0,003
RMS	0,005	0,007	0,013	0,009	0,016

Comparando as discrepâncias para latitude, longitude, altitude elipsoidal, planimétrica e tridimensional verifica-se que houve redução dos valores RMS das discrepâncias para latitude de 0,009 m para 0,005 m (44,4%), de 0,010 m para 0,007 m (30,0%) para longitude, de 0,022 m para 0,013 m (40,9%) para altitude elipsoidal, de 0,013 m para 0,009 m (30,8%) para a discrepância planimétrica e de 0,026 m para 0,016 m (38,5%) para a discrepância tridimensional. Portanto, houve melhora na qualidade da transformação após eliminação das 10 estações no processo de estimação. Esse fato indica que o emprego de injunções e ponderação das observações podem proporcionar melhores resultados.

A validação externa dos parâmetros de transformação foi realizada com base nas coordenadas de 36 estações que possuem coordenadas no IGB08 (época 2015,594) e SIRGAS2000 (época 2000,4) e pertencem simultaneamente às redes SIRGAS-CON e RBMC e foram atualizadas com base em 19 modelos de velocidade.

A Tabela 38 apresenta os valores dos RMS das discrepâncias planimétricas (RMS_{D2D}) para cada combinação de parâmetros de transformação com os 19 modelos de movimento da placa SOAM obtidos das discrepâncias das 36 estações.

Tabela 38 - RMS das discrepâncias planimétricas (em metros).

Modelos de Velocidade	Parâmetros de Transformação			RMS_{D2D}	
	PT_Carvalho	IBGE-PPP	IERS	$\Delta 1$	$\Delta 2$
ITRF2000	0,015	0,029	0,016	-0,001	0,013
ITRF2005	0,017	0,013	0,015	0,002	-0,002
ITRF2008	0,019	0,027	0,018	0,001	0,009
APKIM2005D	0,029	0,030	0,027	0,002	0,003
APKIM2008D	0,018	0,019	0,017	0,001	0,002
NNR-MORVEL56	0,042	0,050	0,041	0,001	0,009
Costa, Santos e Gemaël (2003)	0,135	0,133	0,138	-0,003	-0,005
Perez, Monico e Chaves (2003)	0,022	0,024	0,020	0,002	0,004
Souza e Garnés (2014)	0,014	0,015	0,012	0,002	0,003
Souza (2013)	0,014	0,021	0,012	0,002	0,009
MV_Carvalho	0,013	0,016	0,012	0,001	0,004
Grade_VEMOS2009	0,018	0,021	0,015	0,003	0,006
VEMOS 2014	0,013	0,017	0,013	0,000	0,004

GSRM_2.1	0,032	0,024	0,030	0,002	-0,006
GEODVEL2010 (NNR)	0,028	0,037	0,027	0,001	0,010
SOPAC 2004	0,021	0,033	0,021	0,000	0,012
REVEL2000	0,032	0,047	0,033	-0,001	0,014
NNR-NUVEL-1A	0,023	0,038	0,025	-0,002	0,013
PB2002	0,023	0,038	0,025	-0,002	0,013

Onde: $\Delta 1$ é a diferença do RMS_{D2D} (PT_Carvalho) em relação ao RMS_{D2D} (IERS); e $\Delta 2$ é a diferença do RMS_{D2D} (IBGE-PPP) em relação ao RMS_{D2D} (IERS).

A Figura 47 ilustra as discrepâncias planimétricas da transformação e atualização realizada com base na aplicação dos parâmetros PT_Carvalho, IERS e IBGE-PPP e dos modelos de movimento da placa SOAM.

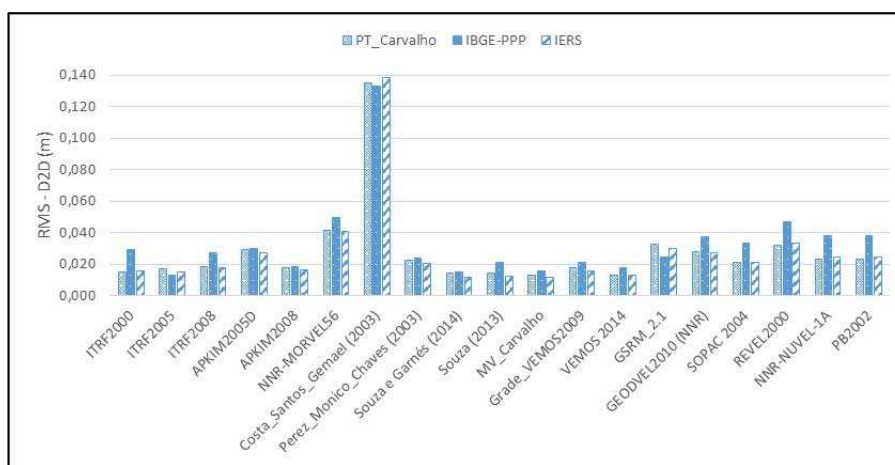


Figura 47 - RMS das discrepâncias planimétricas.

Percebe-se facilmente na Figura 47 que o modelo Costa, Santos e Gemael (2003) proporcionou valor de RMS da discrepância planimétrica maior do que os demais modelos. As velocidades médias (com base em 36 estações) para todos os modelos são de 1,2 e 1,3 cm/ano, exceto para a velocidade média fornecida pelo modelo Costa, Santos e Gemael (2003) que foi de 2,2 cm/ano. No que se refere a velocidade média variando de 1,2 a 1,3 cm/ano é concordante com o apresentado por Da Silva, Costa e Vaz (2010). O valor da velocidade média 1,2 cm/ano é uma característica que pode ser notada em praticamente todas as estações localizadas no Brasil (DA SILVA; COSTA; VAZ, 2010).

A norma do vetor velocidade tem valor médio de modo geral muito similar, mas isso não ocorre com a direção do deslocamento da estação. A variabilidade em termos de amplitude total considerando todos os modelos de velocidade para o valor médio da magnitude do vetor velocidade obtido por cada modelo foi de 0,003 m e de 13,75° para o azimute.

As Tabelas 39, 40 e 41 apresentam em ordem crescente os valores do RMS das discrepâncias planimétricas, em metros, calculados com base nas discrepâncias obtidas

nas 36 estações e empregando-se diferentes parâmetros de transformação e modelos de movimento para a placa SOAM.

Tabela 39 - RMS das discrepâncias planimétricas (em metros).

Modelos de Velocidade	Posição	Parâmetros de Transformação PT Carvalho	Δ RMS
VEMOS 2014	1	0,013	-
MV_Carvalho	2	0,013	0,000
Souza (2013)	3	0,014	0,001
Souza e Garnés (2014)	4	0,014	0,001
ITRF2000	5	0,015	0,002
ITRF2005	6	0,017	0,004
Grade_VEMOS2009	7	0,018	0,005
APKIM2008D	8	0,018	0,005
ITRF2008	9	0,019	0,006
SOPAC 2004	10	0,021	0,008
Perez, Monico e Chaves (2003)	11	0,022	0,009
PB2002	12	0,023	0,010
NNR-NUVEL-1A	13	0,023	0,010
GEODVEL2010 (NNR)	14	0,028	0,015
APKIM2005D	15	0,029	0,016
REVEL2000	16	0,032	0,019
GSRM_2.1	17	0,032	0,019
NNR-MORVEL56	18	0,042	0,029
Costa, Santos e Gemaël (2003)	19	0,135	0,122

Tabela 40 - RMS das discrepâncias planimétricas (em metros).

Modelos de Velocidade	Posição	Parâmetros de Transformação IBGE-PPP	Δ RMS
ITRF2005	1	0,013	-
Souza e Garnés (2014)	2	0,015	0,002
MV_Carvalho	3	0,016	0,002
VEMOS 2014	4	0,017	0,004
APKIM2008D	5	0,019	0,005
Souza (2013)	6	0,021	0,008
Grade_VEMOS2009	7	0,021	0,008
Perez, Monico e Chaves (2003)	8	0,024	0,011
GSRM_2.1	9	0,024	0,011
ITRF2008	10	0,027	0,014
ITRF2000	11	0,029	0,016
APKIM2005D	12	0,030	0,017
SOPAC 2004	13	0,033	0,020
GEODVEL2010 (NNR)	14	0,037	0,024
NNR-NUVEL-1A	15	0,038	0,025
PB2002	16	0,038	0,025
REVEL2000	17	0,047	0,034
NNR-MORVEL56	18	0,050	0,037
Costa, Santos e Gemaël (2003)	19	0,135	0,122

Tabela 41 - RMS das discrepâncias planimétricas (em metros).

Modelos de Velocidade	Posição	Parâmetros de Transformação	Δ RMS
		IERS	
Souza e Garnés (2014)	1	0,012	-
MV_Carvalho (2015)	2	0,012	0,000
Souza (2013)	3	0,012	0,000
VEMOS 2014	4	0,013	0,002
ITRF2005	5	0,015	0,003
Grade_VEMOS2009	6	0,015	0,004
ITRF2000	7	0,016	0,004
APKIM2008D	8	0,017	0,005
ITRF2008	9	0,018	0,006
Perez, Monico e Chaves (2003)	10	0,021	0,009
SOPAC 2004	11	0,021	0,009
NNR-NUVEL-1A	12	0,025	0,013
PB2002	13	0,025	0,013
GEODVEL2010 (NNR)	14	0,027	0,015
APKIM2005D	15	0,027	0,016
GSRM_2.1	16	0,030	0,018
REVEL2000	17	0,033	0,022
NNR-MORVEL56	18	0,041	0,029
Costa, Santos e Gemaél (2003)	19	0,138	0,126

Na Tabela 39, encontram-se os valores do RMS das discrepâncias planimétricas ordenadas em ordem crescente os quais possibilitam a escolha do modelo de velocidade combinado com os parâmetros PT_Carvalho que proporciona melhores resultados. Desse modo, foi verificado que os modelos VEMOS2014, MV_Carvalho e Souza (2013) proporcionaram os menores valores de RMS para essas discrepâncias.

Com base na Tabela 40, o emprego dos parâmetros de transformação utilizados no IBGE-PPP com os modelos ITRF2005, Souza e Garnés (2014) e MV_Carvalho proporcionaram valores menores para o RMS das discrepâncias planimétricas.

Na Tabela 41, observa-se que a combinação dos parâmetros de transformação disponibilizados pelo IERS em conjunto com os modelos Souza e Garnés (2014) ou MV_Carvalho ou Souza (2013) forneceram os menores valores para o RMS das discrepâncias planimétricas.

Ressalta-se mais uma vez que os valores dos RMS das discrepâncias foram calculadas para cada combinação (modelo de velocidade e parâmetros de transformação) com base nas discrepâncias obtidas para as 36 estações (não participantes na estimação PT_Carvalho).

As Figuras 48, 49 e 50 ilustram os RMS das discrepâncias planimétricas obtidas da comparação das coordenadas calculadas com base nos parâmetros de transformação

PT_Carvalho, IBGE-PPP e IERS com o emprego de 19 modelos de movimento para a placa SOAM com as disponíveis nos descritivos das estações.

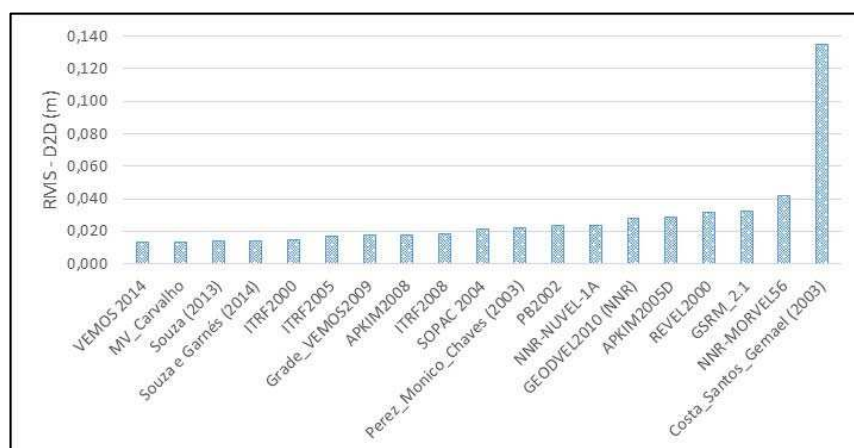


Figura 48 - RMS das discrepâncias planimétricas com uso dos parâmetros PT_Carvalho.

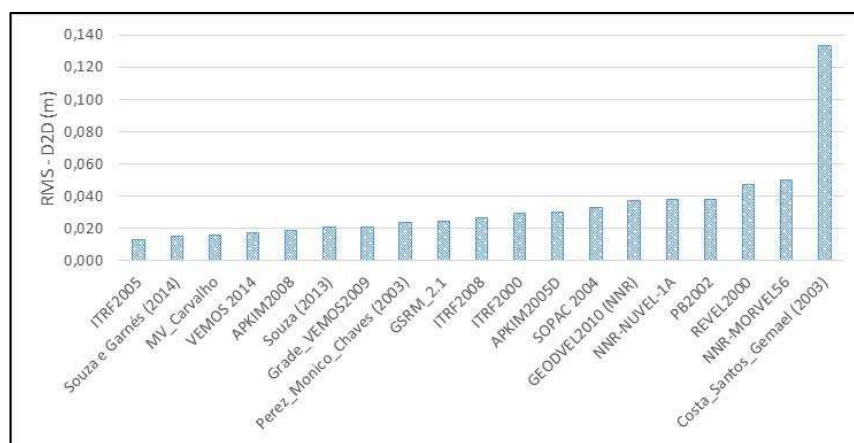


Figura 49 - RMS das discrepâncias planimétricas com base nos parâmetros IBGE-PPP.

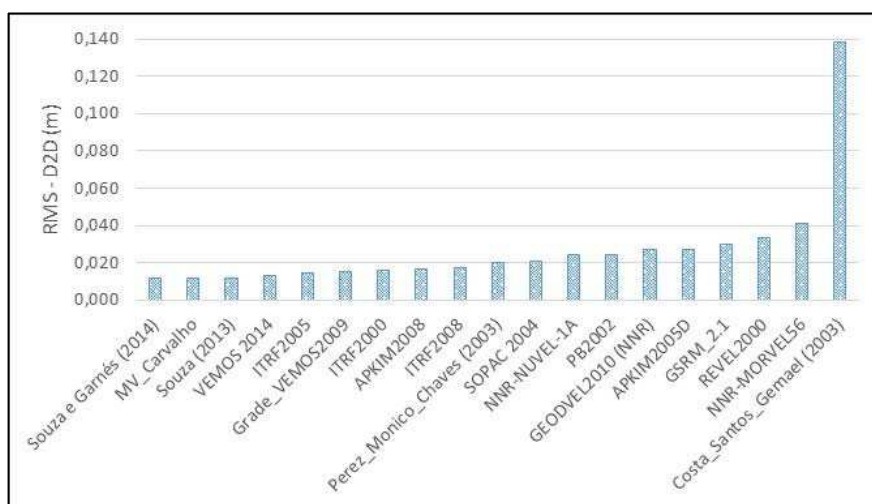


Figura 50 - RMS das discrepâncias planimétricas com base nos parâmetros do IERS.

A Tabela 42 apresenta os valores dos RMS das discrepâncias altimétricas (altitude elipsoidal) para cada combinação de parâmetros de transformação com os 19 modelos de movimento da placa SOAM e obtidos das discrepâncias das 36 estações.

Tabela 42 - RMS das discrepâncias altimétricas

Modelos de Velocidade	Parâmetros de Transformação		
	PT_Carvalho	IBGE-PPP	IERS
ITRF2000	0,031	0,030	0,026
ITRF2005	0,031	0,030	0,026
ITRF2008	0,030	0,032	0,026
APKIM2005D	0,031	0,030	0,026
APKIM2008D	0,031	0,030	0,026
NNR-MORVEL56	0,031	0,030	0,026
Costa, Santos e Gemael (2003)	0,031	0,030	0,026
Perez, Monico e Chaves (2003)	0,031	0,030	0,026
Souza e Garnés (2014)	0,031	0,030	0,026
Souza (2013)	0,031	0,030	0,026
MV_Carvalho	0,031	0,030	0,026
Grade_VEMOS2009	0,033	0,029	0,027
VEMOS 2014	0,031	0,030	0,026
GSRM_2.1	0,031	0,030	0,026
GEODVEL2010 (NNR)	0,032	0,032	0,028
SOPAC 2004	0,031	0,030	0,026
REVEL2000	0,031	0,030	0,026
NNR-NUVEL-1A	0,031	0,030	0,026
PB2002	0,031	0,030	0,026

A Figura 51 ilustra os valores dos RMS das discrepâncias altimétricas obtidas com base no emprego de 3 diferentes conjuntos de parâmetros de transformação e 19 modelos de movimento da placa SOAM.

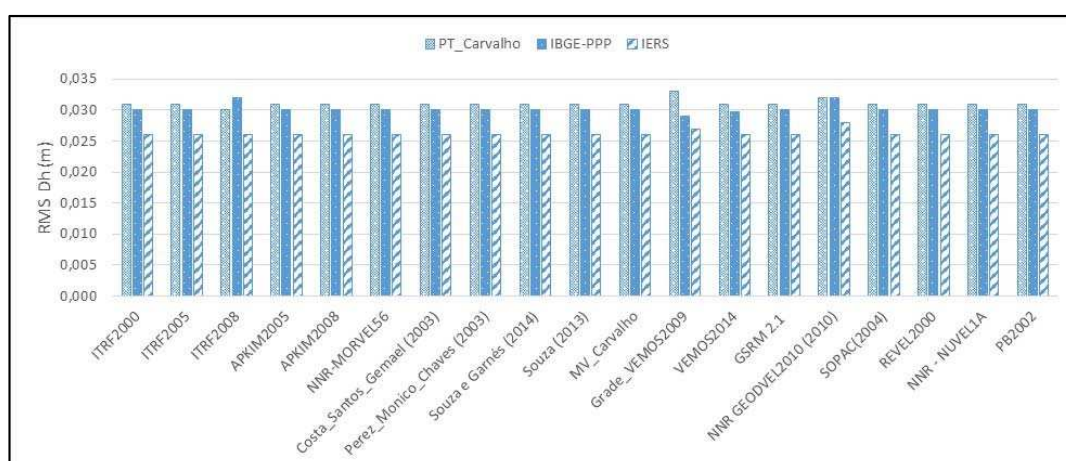


Figura 51 - RMS das discrepâncias altimétricas.

A Tabela 42 e a Figura 51 ilustram os valores dos RMS das discrepâncias altimétricas obtidos para cada combinação de parâmetros de transformação e modelo de movimento da placa SOAM. Como estes modelos permitem calcular apenas o movimento horizontal das estações é de se esperar que não haja variação dos valores altitude elipsoidal com a atualização das coordenadas. Desse modo, verifica-se que as diferenças dos valores desses RMS são devido ao emprego dos diferentes parâmetros de transformação. E, os parâmetros do IERS proporcionaram menores valores de RMS para discrepâncias altimétrica conforme pode ser visualizado na Figura 51

A amplitude total (AT) do RMS da discrepância altimétrica com uso dos parâmetros PT_Carvalho e IBGE-PPP com uso dos diferentes modelos foi de 0,003 m e para o emprego dos parâmetros do IERS foi de 0,002 m.

Os valores de RMS das discrepâncias altimétricas máximos para PT_Carvalho, IBGE-PPP e IERS foram, respectivamente, iguais a 0,033 m, 0,032 m e 0,028 m e mínimos, iguais a 0,030 m, 0,029 m e 0,026. Desse modo, a diferença dos valores máximos RMS foi de 0,005 m entre PT_Carvalho e IERS e mínimo de 0,001 m entre PT_Carvalho e IBGE-PPP.

Pôde-se observar nos dados da Tabela 42 e na Figura 51 que o modelo de movimento não interfere na obtenção da altitude elipsoidal, mas a escolha dos parâmetros de transformação afeta sua determinação.

A Tabela 43 apresenta os valores dos RMS das discrepâncias tridimensionais para cada combinação de parâmetros de transformação com modelo de velocidade da placa SOAM obtidos das discrepâncias das 36 estações.

Tabela 43 - RMS das discrepâncias tridimensionais (em metros).

Modelos de Velocidade	Parâmetros de Transformação		
	PT_Carvalho	IBGE-PPP	IERS
ITRF2000	0,035	0,042	0,031
ITRF2005	0,036	0,033	0,030
ITRF2008	0,035	0,042	0,032
APKIM2005D	0,043	0,042	0,038
APKIM2008DD	0,036	0,035	0,031
NNR-MORVEL56	0,052	0,058	0,049
Costa, Santos e Gemaél (2003)	0,139	0,136	0,141
Perez, Monico e Chaves (2003)	0,038	0,038	0,033
Souza e Garnés (2014)	0,034	0,033	0,029
Souza (2013)	0,034	0,036	0,029
MV_Carvalho	0,034	0,034	0,029
Grade_VEMOS2009	0,037	0,036	0,031
VEMOS 2014	0,034	0,035	0,029

GSRM_2.1	0,045	0,038	0,040
GEODVEL2010 (NNR)	0,042	0,049	0,039
SOPAC 2004	0,038	0,045	0,034
REVEL2000	0,045	0,056	0,042
NNR-NUVEL1A	0,039	0,048	0,036
PB2002	0,039	0,048	0,036

A Figura 52 ilustra os valores dos RMS das discrepâncias tridimensionais (RMS_{D3D}) obtidas com base no emprego de 3 diferentes conjuntos de parâmetros de transformação e 19 modelos de movimento da placa SOAM.

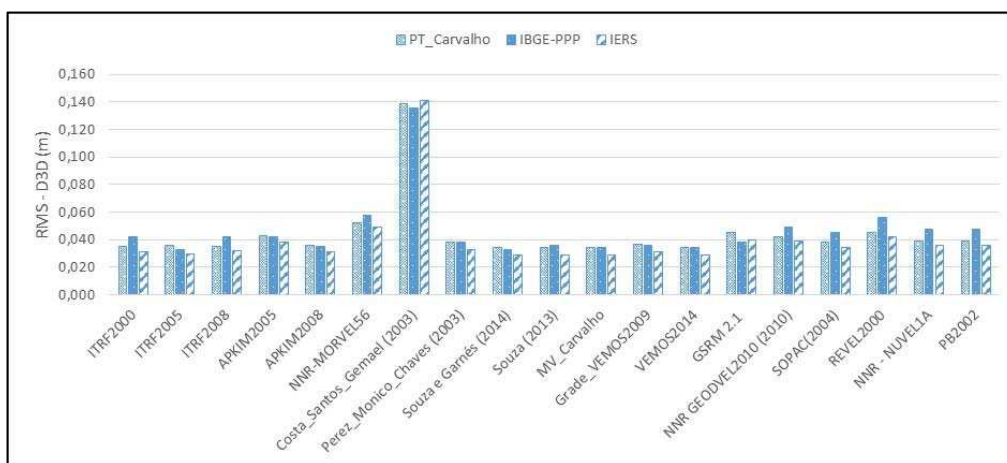


Figura 52 - RMS das discrepâncias tridimensionais.

As Tabelas 44, 45 e 46 apresentam em ordem crescente o RMS_{D3D} , em metros, calculados com base em 36 estações com uso dos parâmetros PT_Carvalho, IBGE-PPP e IERS e diferentes modelos de movimento da placa SOAM.

Tabela 44 - RMS_{D3D} obtidos om base em PT_Carvalho e diferentes modelos de velocidade.

Modelos de Velocidade	Posição	Parâmetros de Transformação PT Carvalho	ΔRMS_{D3D}
Souza e Garnés (2014)	1	0,034	-
Souza (2013)	2	0,034	0,000
MV_Carvalho	3	0,034	0,000
VEMOS2014	4	0,034	0,000
ITRF2000	5	0,035	0,001
ITRF2008	6	0,035	0,001
ITRF2005	7	0,036	0,002
APKIM2008DD	8	0,036	0,002
Grade_VEMOS2009	9	0,037	0,003
Perez, Monico e Chaves (2003)	10	0,038	0,004
SOPAC(2004)	11	0,038	0,004
NNR - NUVEL1A	12	0,039	0,005
PB2002	13	0,039	0,005
NNR GEODVEL2010 (2010)	14	0,042	0,008

APKIM2005	15	0,043	0,009
GSRM 2.1 (2014)	16	0,045	0,011
REVEL2000	17	0,045	0,011
NNR-MORVEL56	18	0,052	0,018
Costa, Santos e Gemaél (2003)	19	0,139	0,105

Onde: $\Delta \text{RMS}_{\text{D3D}}$ é a diferença do valor do RMS_{D3D} na posição $i+1$ menos RMS_{D3D} da primeira posição. Onde i varia de 1 a 18.

Tabela 45 - RMS_{D3D} obtidos om base em IBGE-PPP e diferentes modelos de velocidade.

Modelos de Velocidade	Posição	Parâmetros de Transformação	$\Delta \text{RMS}_{\text{D3D}}$
		IBGE-PPP	
ITRF2005	1	0,033	-
Souza e Garnés (2014)	2	0,033	0,000
MV_Carvalho	3	0,034	0,001
VEMOS2014	4	0,035	0,002
APKIM2008DD	5	0,035	0,002
Souza (2013)	6	0,036	0,003
Grade_VEMOS2009	7	0,036	0,003
Perez, Monico e Chaves (2003)	8	0,038	0,005
GSRM 2.1 (2014)	9	0,038	0,005
ITRF2000	10	0,042	0,009
ITRF2008	11	0,042	0,009
APKIM2005	12	0,042	0,009
SOPAC(2004)	13	0,045	0,012
NNR - NUVEL1A	14	0,048	0,015
PB2002	15	0,048	0,015
NNR GEODVEL2010 (2010)	16	0,049	0,016
REVEL2000	17	0,056	0,023
NNR-MORVEL56	18	0,058	0,025
Costa, Santos e Gemaél (2003)	19	0,136	0,103

Tabela 46 - RMS_{D3D} obtidos om base em IERS e modelos de velocidade.

Modelos de Velocidade	Posição	Parâmetros de Transformação	$\Delta \text{RMS}_{\text{D3D}}$
		IERS	
Souza e Garnés (2014)	1	0,029	-
Souza (2013)	2	0,029	0,000
MV_Carvalho	3	0,029	0,000
VEMOS2014	4	0,029	0,000
ITRF2005	5	0,030	0,001
ITRF2000	6	0,031	0,002
APKIM2008D	7	0,031	0,002
Grade_VEMOS2009	8	0,031	0,002
ITRF2008	9	0,032	0,003
Perez, Monico e Chaves (2003)	10	0,033	0,004
SOPAC(2004)	11	0,034	0,005
NNR - NUVEL1A	12	0,036	0,007
PB2002	13	0,036	0,007
APKIM2005	14	0,038	0,009
NNR GEODVEL2010 (2010)	15	0,039	0,010

GSRM 2.1 (2014)	16	0,040	0,011
REVEL2000	17	0,042	0,013
NNR-MORVEL56	18	0,049	0,020
Costa, Santos e Gemaël (2003)	19	0,141	0,112

Com base nos dados da Tabela 44 verifica-se que os modelos propostos por Souza e Garnés (2014), Souza (2013), MV_Carvalho e VEMOS 2014 em combinação com os parâmetros de transformação PT_Carvalho apresentaram menor valor (0,034 m) para o RMS para as D3D. O maior valor (0,139 m) foi encontrado com o emprego do modelo de Costa, Santos e Gemaël (2003) que comparado com o menor valor resulta numa diferença de 0,105 m. Considerando a diferença do valor do RMS_{D3D} entre o penúltimo e o primeiro modelo, tem-se 0,018 m, ou seja, diferença de 52,94%. Salienta-se que foi escolhido o penúltimo para essa comparação, pois foi o modelo que proporcionou valor de RMS_{D3D} não tão discrepante dos demais.

O emprego dos parâmetros de transformação do IBGE-PPP em combinação com os modelos de movimento proporcionou os resultados apresentados na Tabela 45. Nesta tabela, observa-se que os menores valores (0,033 m e 0,034 m) para o RMS_{D3D} foram encontrados com o uso, respectivamente, dos modelos ITRF2005, Souza e Garnés (2014) e MV_Carvalho. O maior valor (0,136 m) para o RMS_{D3D} foi encontrado quando do emprego do modelo Costa, Santos e Gemaël (2003) que comparado com o menor valor resulta numa diferença de 0,103 m. Considerando a diferença de RMS_{D3D} entre o penúltimo e o primeiro modelo, tem-se 0,025 m, ou seja, diferença de 75,8%.

Os menores valores do RMS_{D3D} encontrados na Tabela 46 foram obtidos com o emprego dos modelos Souza e Garnés (2014), Souza (2013), MV_Carvalho e VEMOS2014 e foram iguais a 0,029 m. O maior valor (0,141 m) para o RMS das discrepâncias tridimensionais foi encontrado quando do emprego do modelo Costa, Santos e Gemaël (2003) que comparado com o menor valor leva à diferença de levando a uma diferença de 0,112 m. Considerando a diferença do valor do RMS_{D3D} entre o penúltimo e o primeiro modelo, tem-se 0,020 m, ou seja, diferença de 69%.

A comparação dos dados presentes nas Tabelas 44, 45 e 46 possibilita verificar que a melhor solução do posicionamento foi obtida com o emprego dos parâmetros do IERS com os modelos Souza e Garnés (2014), Souza (2013), MV_Carvalho e VEMOS2014.

Na Tabela 47 estão disponíveis as diferenças, em metros, dos valores do RMS_{D3D} obtidas com base nos modelos de velocidades e parâmetros de transformação de PT_Carvalho e IBGE-PPP em relação ao do IERS.

As diferença foram realizadas com base nos valores de RMS_{D3D} ordenadas do menor para o maior valor.

Tabela 47 - Diferença dos valores dos RMS_{D3D} .

Posição	RMS_{D3D} (PT_Carvalho – IERS)	RMS_{D3D} (IBGE-PPP – IERS)
1	0,005	0,004
2	0,005	0,004
3	0,005	0,005
4	0,005	0,006
5	0,005	0,005
6	0,004	0,005
7	0,005	0,005
8	0,005	0,007
9	0,005	0,006
10	0,005	0,009
11	0,004	0,008
12	0,003	0,006
13	0,003	0,009
14	0,004	0,010
15	0,004	0,009
16	0,005	0,009
17	0,003	0,014
18	0,003	0,009
19	-0,002	-0,005

As Figuras 53, 54 e 55 ilustram os valores dos RMS_{D3D} obtidas da comparação das coordenadas de 36 estações calculadas com base no uso dos parâmetros de transformação PT_Carvalho, IBGE-PPP e IERS e atualizadas empregando-se 19 modelos de velocidades.

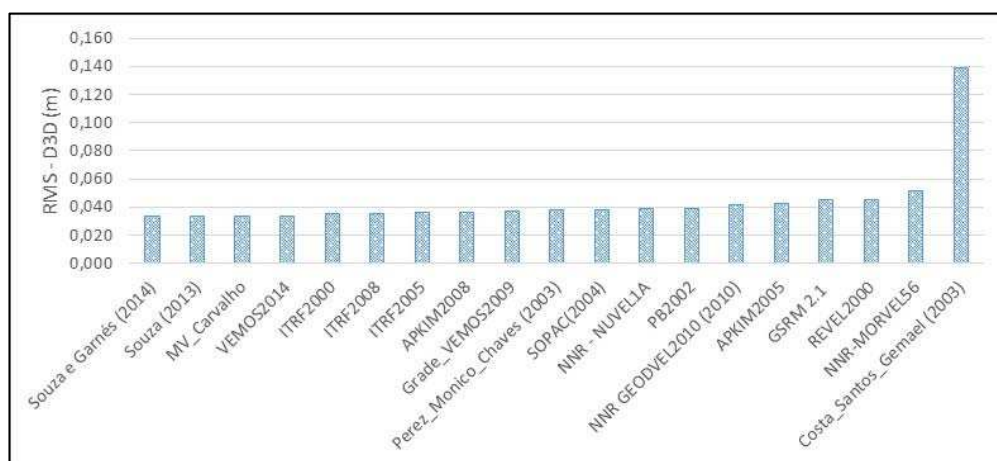


Figura 53 - RMS_{D3D} obtidos com uso dos parâmetros PT_Carvalho e modelos de velocidades.

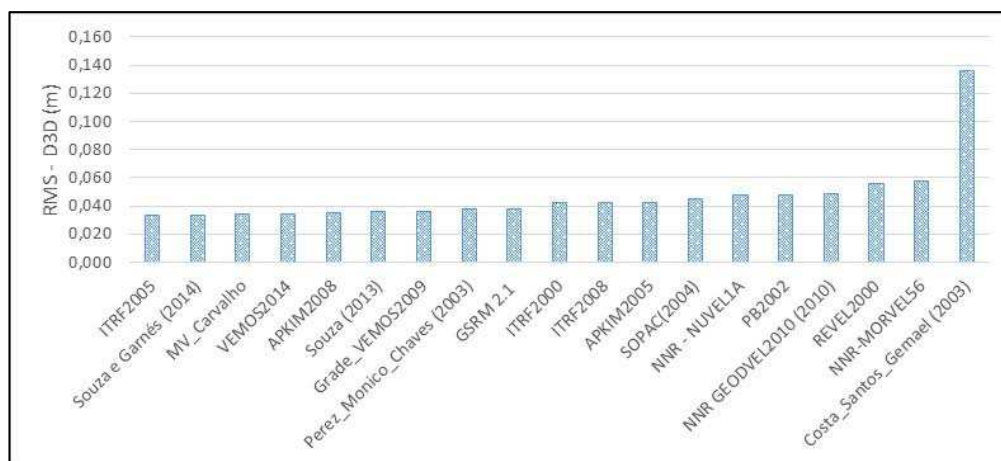


Figura 54 - RMS_{D3D} obtidos com base nos parâmetros IBGE-PPP e modelos de velocidades.

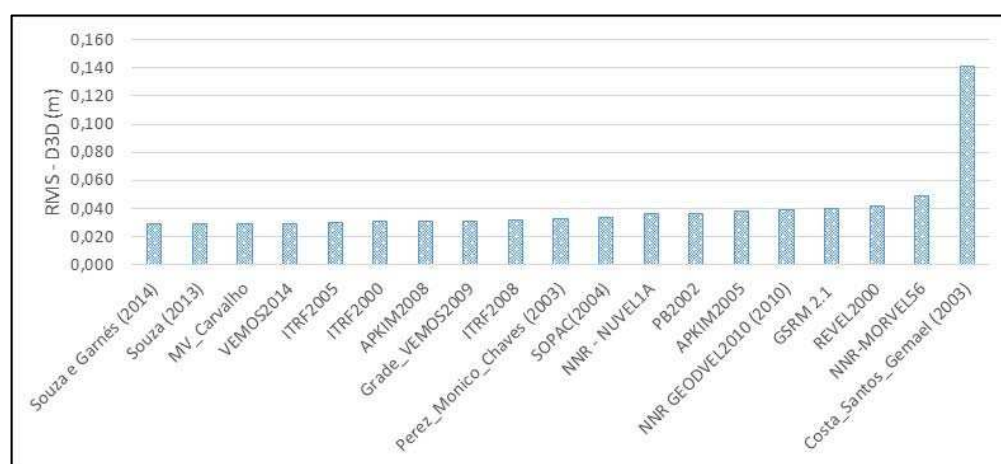


Figura 55 - RMS_{D3D} obtidos com base nos parâmetros do IERS e modelos de velocidades.

Nas Tabelas 48, 49 e 50 encontram-se algumas estatísticas para as discrepâncias posicionais encontradas com base no emprego de 19 modelos de velocidades e os parâmetros de transformação estimados por PT_Carvalho, IBGE-PPP e IERS.

Tabela 48 - Estatísticas para as discrepâncias altimétricas, planimétricas e tridimensionais.

Modelos de Velocidade	Discrepâncias (m)	PT_Carvalho				
		Média	Mediana	Máximo	Mínimo	AT
ITRF2000	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,014	0,011	0,025	0,011	0,014
	D3D	0,028	0,020	0,092	0,011	0,081
ITRF2005	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,015	0,015	0,033	0,000	0,033
	D3D	0,029	0,023	0,093	0,003	0,091
ITRF2008	δh	0,016	0,011	0,090	-0,015	0,105
	D2D	0,017	0,015	0,037	0,011	0,025

	D3D	0,030	0,025	0,090	0,011	0,079
APKIM2005 (DGFI)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,027	0,029	0,053	0,011	0,042
	D3D	0,039	0,035	0,091	0,016	0,076
APKIM2008D	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,016	0,015	0,035	0,000	0,035
	D3D	0,030	0,024	0,094	0,003	0,091
NNR-MORVEL56	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,040	0,039	0,060	0,016	0,044
	D3D	0,049	0,046	0,094	0,025	0,069
Costa, Santos e Gemael (2003)	δh	0,020	0,015	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,135	0,134	0,161	0,114	0,048
	D3D	0,138	0,137	0,185	0,114	0,071
Perez, Monico e Chaves (2003)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,020	0,021	0,040	0,000	0,040
	D3D	0,033	0,031	0,092	0,011	0,081
Souza e Garnés (2014)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,013	0,011	0,025	0,000	0,025
	D3D	0,027	0,021	0,094	0,003	0,091
Souza (2013)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,013	0,015	0,025	0,000	0,025
	D3D	0,028	0,021	0,092	0,009	0,083
MV_Carvalho	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,012	0,011	0,025	0,000	0,025
	D3D	0,027	0,020	0,094	0,003	0,091
Grade_VEMOS2009	δh	0,022	0,017	0,095	-0,007	0,102
	D2D	0,016	0,015	0,031	0,000	0,031
	D3D	0,031	0,025	0,097	0,011	0,086
VEMOS2014	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,010	0,011	0,033	0,000	0,033
	D3D	0,026	0,017	0,097	0,007	0,090
GSRM 2.1 (2014)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,030	0,031	0,059	0,000	0,059
	D3D	0,042	0,040	0,094	0,016	0,078
NNR GEODVEL2010 (2010)	δh	0,018	0,013	0,094	-0,015	0,109
	D2D	0,027	0,025	0,046	0,000	0,046
	D3D	0,038	0,035	0,094	0,016	0,078
SOPAC(2004)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,020	0,022	0,033	0,000	0,033
	D3D	0,033	0,027	0,091	0,002	0,089
REVEL2000	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,031	0,034	0,046	0,011	0,034
	D3D	0,041	0,038	0,091	0,015	0,077
NNR - NUVEL1A	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,022	0,022	0,040	0,000	0,040
	D3D	0,033	0,027	0,093	0,002	0,092
PB2002	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,022	0,023	0,040	0,000	0,040
	D3D	0,033	0,027	0,093	0,002	0,092

Tabela 49 - Estatísticas para as discrepâncias altimétricas, planimétricas e tridimensionais.

Modelos de Velocidade	Discrepâncias (m)	IBGE-PPP				
		Média	Mediana	Máximo	Mínimo	AT
ITRF2000	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,029	0,030	0,040	0,019	0,021
	D3D	0,041	0,040	0,067	0,025	0,041
ITRF2005	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,011	0,011	0,025	0,000	0,025
	D3D	0,030	0,028	0,065	0,006	0,059
ITRF2008	δh	-0,017	-0,020	0,062	-0,050	0,112
	D2D	0,025	0,025	0,047	0,000	0,047
	D3D	0,040	0,040	0,063	0,024	0,039
APKIM2005 (DGFI)	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,029	0,025	0,049	0,011	0,038
	D3D	0,041	0,041	0,065	0,022	0,043
APKIM2008D	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,016	0,015	0,040	0,000	0,040
	D3D	0,032	0,032	0,068	0,006	0,062
NNR-MORVEL56	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,048	0,046	0,074	0,024	0,050
	D3D	0,057	0,056	0,083	0,034	0,050
Costa, Santos e Gemael (2003)	δh	-0,013	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,133	0,135	0,163	0,110	0,053
	D3D	0,136	0,137	0,167	0,112	0,054
Perez, Monico e Chaves (2003)	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,022	0,022	0,047	0,011	0,036
	D3D	0,036	0,036	0,067	0,012	0,054
Souza e Garnés (2014)	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,014	0,011	0,025	0,009	0,015
	D3D	0,031	0,032	0,064	0,012	0,051
Souza (2013)	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,020	0,022	0,035	0,000	0,035
	D3D	0,035	0,032	0,063	0,013	0,049
MV_Carvalho	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,015	0,013	0,033	0,010	0,023
	D3D	0,031	0,032	0,064	0,012	0,051
Grade_VEMOS2009	δh	-0,011	-0,015	0,066	-0,044	0,110
	D2D	0,020	0,022	0,035	0,011	0,024
	D3D	0,034	0,030	0,067	0,012	0,055
VEMOS2014	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,016	0,015	0,035	0,000	0,035
	D3D	0,032	0,031	0,065	0,007	0,057
GSRM 2.1 (2014)	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,022	0,022	0,050	0,000	0,050
	D3D	0,036	0,037	0,063	0,011	0,052
	δh	-0,016	-0,019	0,065	-0,052	0,117
	D2D	0,036	0,035	0,055	0,011	0,044

NNR GEODVEL2010	D3D	0,048	0,048	0,069	0,033	0,036
SOPAC(2004)	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,032	0,035	0,047	0,016	0,031
	D3D	0,044	0,041	0,065	0,031	0,034
REVEL2000	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,046	0,046	0,060	0,030	0,029
	D3D	0,055	0,056	0,074	0,040	0,034
NNR - NUVEL1A	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,036	0,035	0,055	0,009	0,046
	D3D	0,047	0,046	0,072	0,031	0,041
PB2002	δh	-0,014	-0,018	0,063	-0,046	0,109
	D2D	0,037	0,035	0,055	0,009	0,046
	D3D	0,047	0,046	0,072	0,031	0,041

Tabela 50 - Estatísticas para as discrepâncias altimétricas, planimétricas e tridimensionais.

Modelos de Velocidade	Discrepâncias (m)	IERS				
		Média	Mediana	Máximo	Mínimo	AT
ITRF2000	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,014	0,011	0,025	0,011	0,014
	D3D	0,028	0,020	0,092	0,011	0,081
ITRF2005	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,015	0,015	0,033	0,000	0,033
	D3D	0,029	0,023	0,093	0,003	0,091
ITRF2008	δh	0,016	0,011	0,090	-0,015	0,105
	D2D	0,017	0,015	0,037	0,011	0,025
	D3D	0,030	0,025	0,090	0,011	0,079
APKIM2005 (DGFI)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,027	0,029	0,053	0,011	0,042
	D3D	0,039	0,035	0,091	0,016	0,076
APKIM2008D	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,016	0,015	0,035	0,000	0,035
	D3D	0,030	0,024	0,094	0,003	0,091
NNR-MORVEL56	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,040	0,039	0,060	0,016	0,044
	D3D	0,049	0,046	0,094	0,025	0,069
Costa, Santos e Gemael (2003)	δh	0,020	0,015	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,135	0,134	0,161	0,114	0,048
	D3D	0,138	0,137	0,185	0,114	0,071
Perez, Monico e Chaves (2003)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,020	0,021	0,040	0,000	0,040
	D3D	0,033	0,031	0,092	0,011	0,081
Souza e Garnés (2014)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,013	0,011	0,025	0,000	0,025
	D3D	0,027	0,021	0,094	0,003	0,091
Souza (2013)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,013	0,015	0,025	0,000	0,025
	D3D	0,028	0,021	0,092	0,009	0,083

MV_Carvalho	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,012	0,011	0,025	0,000	0,025
	D3D	0,027	0,020	0,094	0,003	0,091
Grade_VEMOS2009	δh	0,022	0,017	0,095	-0,007	0,102
	D2D	0,016	0,015	0,031	0,000	0,031
	D3D	0,031	0,025	0,097	0,011	0,086
VEMOS2014	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,010	0,011	0,033	0,000	0,033
	D3D	0,026	0,017	0,097	0,007	0,090
GSRM 2.1 (2014)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,030	0,031	0,059	0,000	0,059
	D3D	0,042	0,040	0,094	0,016	0,078
NNR GEODVEL2010 (2010)	δh	0,018	0,013	0,094	-0,015	0,109
	D2D	0,027	0,025	0,046	0,000	0,046
	D3D	0,038	0,035	0,094	0,016	0,078
SOPAC(2004)	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,020	0,022	0,033	0,000	0,033
	D3D	0,033	0,027	0,091	0,002	0,089
REVEL2000	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,031	0,034	0,046	0,011	0,034
	D3D	0,041	0,038	0,091	0,015	0,077
NNR - NUVEL1A	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,022	0,022	0,040	0,000	0,040
	D3D	0,033	0,027	0,093	0,002	0,092
PB2002	δh	0,019	0,014	0,091	-0,011	0,102
	D2D	0,022	0,023	0,040	0,000	0,040
	D3D	0,033	0,027	0,093	0,002	0,092

Os dados presentes nas Tabelas 48, 49 e 50 permitem verificar que a variabilidade das discrepâncias altimétricas tem o mesmo valor, independente da escolha do modelo de movimento da placa para um mesmo conjunto de parâmetros de transformação.

Observa-se na Tabela 48 que a variabilidade dos valores médios das discrepâncias altimétricas obtidas com base nos modelos de velocidade e o emprego dos parâmetros PT_Carvalho foi de 0,004 m, onde o maior valor foi de 0,020 m (Costa, Santos e Gemaél (2003) e menor de 0,016 m (ITRF2008). Em termos de discrepância planimétrica média, o menor valor (0,010 m) foi obtido com uso do modelo VEMOS2014 e o maior valor (0,135m) com modelo Costa, Santos e Gemaél (2003). O valor médio máximo (0, 138 m) para a discrepância tridimensional foi obtido com o modelo Costa, Santos e Gemaél (2003) e mínimo (0,026 m) com o VEMOS2014.

Com base nos dados da Tabela 49, tem-se que a variabilidade dos valores médios das discrepâncias altimétricas obtidas com base nos modelos de velocidade e o emprego dos parâmetros do IBGE-PPP foi de 0,004 m, onde em termos absolutos, o maior valor

foi de 0,017 m (ITRF2008) e menor de 0,011 m (Grade VEMOS2009). Em termos de discrepância planimétrica média, o menor valor (0,011 m) foi obtido com uso do modelo ITRF2005 e o maior valor (0,133 m) com modelo Costa, Santos e Gemaél (2003). O valor médio máximo (0,136 m) para a discrepância tridimensional foi obtido com o modelo Costa, Santos e Gemaél (2003) e mínimo (0,03 m) com o ITRF2005.

Na Tabela 50 tem-se que a variabilidade dos valores médios das discrepâncias altimétricas obtidas com base nos modelos de velocidade e o emprego dos parâmetros do IERS foi de 0,006 m, onde o menor valor foi de 0,016 m (ITRF2008) e maior de 0,022 m (Grade VEMOS2009). Em termos de discrepância planimétrica média, o menor valor (0,010 m) foi obtido com uso do modelo VEMOS2014 e o maior valor (0,135 m) com modelo Costa, Santos e Gemaél (2003). O valor médio máximo (0,138 m) para a discrepância tridimensional foi obtido com o modelo Costa, Santos e Gemaél (2003) e mínimo (0,026 m) com o VEMOS2014.

As discrepâncias posicionais calculadas não estão afetadas apenas pelas incertezas associadas aos parâmetros de transformação e aos modelos de movimento de placa empregados, mas também às coordenadas determinadas na solução semanal da rede SIRGAS-CON.

A qualidade do posicionamento depende da combinação parâmetros de transformação e modelo de movimento. Foi possível com esse experimento identificar as combinações de parâmetros de transformação e modelo de velocidade que proporcionam menores valores para o RMS das discrepâncias posicionais, ou seja, melhora qualidade da determinação da posição das estações.

É importante salientar que foi considerado nos cálculos de mudança de referencial e atualização, as velocidades obtidas com base nos modelos no mesmo referencial das coordenadas de origem.

A validação dos parâmetros de transformação e do modelo movimento para a placa SOAM estimados por MV_Carvalho foi realizada e pôde-se quantificar a qualidade do posicionamento.

Na seção 4.2 são apresentados os resultados do experimento 2, no qual foram realizados o posicionamento relativo com uso de duas estações de controle.

4.2 Experimento 2

O experimento 2 é caracterizado pelo transporte de coordenadas realizados no Brasil e na Argentina no contexto de dois cenários conforme ilustrados nas Figuras 37 e 38 e descritos aqui para facilitar o entendimento. Salienta-se que na etapa de processamento dos dados no LGO (determinação dos vetores linha de base para os dois cenários), as coordenadas das estações de controle são provenientes do arquivo de observação no formato RINEX.

No cenário 1, após obtenção das componentes vetoriais das linhas de base, as coordenadas das estações de controle disponíveis em seus descritivos foram inseridas no ajustamento na forma de parâmetros ponderados e estimou-se as coordenadas das estações de interesse. Como as estações no Brasil estão referenciadas ao SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e as estações na Argentina estão no sistema POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) nota-se que neste cenário desconsidera-se a diferença existente entre os referenciais e época das coordenadas de cada país com o referencial e época das efemérides precisas IGS.

No cenário 2, as coordenadas das estações de controle foram transformadas e atualizadas do SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e do POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) para o IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) e inseridas no ajustamento na forma de parâmetros ponderados. Após estimação das coordenadas das estações de interesse, as mesmas foram transformadas e atualizadas do IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) para SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e para o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) com o emprego dos parâmetros disponibilizados pelo IERS e de 19 modelos de movimento para a placa SOAM.

Salienta-se também que foi executado neste experimento a transformação e atualização das coordenadas de 28 estações da rede RAMSAC/SIRGAS-CON com uso dos parâmetros de transformação do IERS e de 19 modelos de velocidade com intuito de verificar os efeitos desse modelos na qualidade do posicionamento.

É importante salientar que na etapa do processamento das dados GPS nos cenários 1 e 2 foram empregadas efemérides precisas IGS e as coordenadas das estações de controle provenientes dos arquivos de observação GPS.

Os desvios padrão das componentes vetoriais das linhas de base foram obtidos considerando a acurácia planimétrica de $\pm 3 \text{ mm} + 0,1 \text{ ppm}$, possível de se obter no posicionamento relativo estático com uso dos receptores Trimble NetR9 e Leica GR25.

Cabe salientar que outros receptores estão instalados nas estações empregadas nos experimentos, porém, esses receptores foram escolhidos por proporcionarem precisões para as componentes dos vetores linhas de base próximas das fornecidas no processamento das observáveis GPS no LGO.

Desse modo, para cada vetor linha de base, as variâncias de suas componentes foram calculadas de acordo com a seguinte expressão (KUANG, 1996):

$$\sigma_{\Delta X_{ij}}^2 = \sigma_{\Delta Y_{ij}}^2 = \sigma_{\Delta Z_{ij}}^2 = (0,003)^2 + \left(\frac{0,1 \cdot DI_{ij}}{1.000.000} \right)^2 \quad (127)$$

Onde:

$$DI_{ij} = \sqrt{\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2 + \Delta Z_{ij}^2}$$

Sendo:

DI_{ij} : comprimento do vetor linha de base dados em metros; $\sigma_{\Delta X_{ij}}^2 = \sigma_{\Delta Y_{ij}}^2 = \sigma_{\Delta Z_{ij}}^2$: variâncias das componentes vetoriais da linha de base dadas em metros ao quadrado.

A equação (127) permite observar que quanto maior o comprimento do vetor, maior o valor da variância das componentes do vetor linha de base e, conseqüentemente, menor o valor do peso. Optou-se por essa abordagem, pois as variâncias obtidas do processamento dos dados GPS estavam muito otimistas para as magnitudes das linhas de base. Salienta-se que as variâncias são iguais para as componentes de cada vetor linha de base e as covariâncias são iguais à zero.

O transporte de coordenadas com base no posicionamento relativo com uso de duas estações de controle e uma sessão de observação (arquivo diário) foi realizado. No processamento dos dados GPS com uso do LGO apenas as linhas de base independentes que ligam as estações de controle à estação de interesse foram empregadas no ajustamento para determinação posicional.

Após obtenção das componentes vetoriais das linhas de base e respectivos desvios padrão, o ajustamento para obtenção das coordenadas das estações de interesse foi realizado. Na sequência, as coordenadas das estações de interesse no ITRF2008 (IGb08, época 2015,594), foram transformadas e atualizadas para os referenciais POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) e SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4).

A mudança de referencial das coordenadas e velocidades foi realizada com base nos parâmetros disponibilizado pelos IERS e a atualização das coordenadas foi realizada com base no emprego de 19 modelos de movimento para placa SOAM.

As nove (9) estações da rede RBMC (OURI, PRCV, UFPR, SCCH, SCFL, RSCL, POAL, RSAL e RSPE) e da rede RAMSAC (AUTF, CHIM, UNPA, CHLT, PDE3, ESQU, RWSN, 25MA e PATA) e os vetores linhas de base gerados nos processamentos no Brasil e na Argentina podem ser visualizados, respectivamente, nas Figuras 56 e 57.

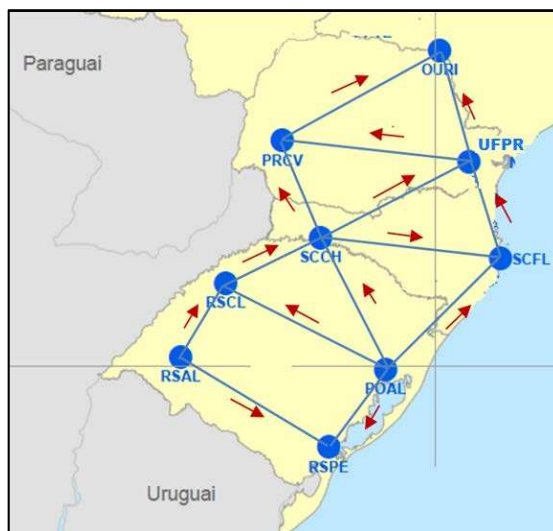


Figura 56 - Posicionamento relativo no Brasil. As setas indicam o sentido do vetor linha de base.

Fonte: Adaptado de http://geofit.ibge.gov.br/RBMC/relatorio/RBMC_2015.pdf -acesso em 11/2015

Tabela 51 - Estações de controle e de interesse empregadas no posicionamento relativo no Brasil.

Identificador da linha de base	Estações de Controle	Rover	Distância aproximada (Km)
1	RSAL	RSPE	390,644
	POAL		228,247
2	RSAL	RSCL	207,637
	POAL		413,484
3	RSCL	SCCH	240,051
	POAL		356,142
4	POAL	SCFL	373,579
	SCCH		406,796
5	SCFL	UFPR	384,929
	SCCH		248,650
6	UFPR	PRCV	256,095
	SCCH		430,180
7	PRCV	OURI	426,397
	UFPR		284,922

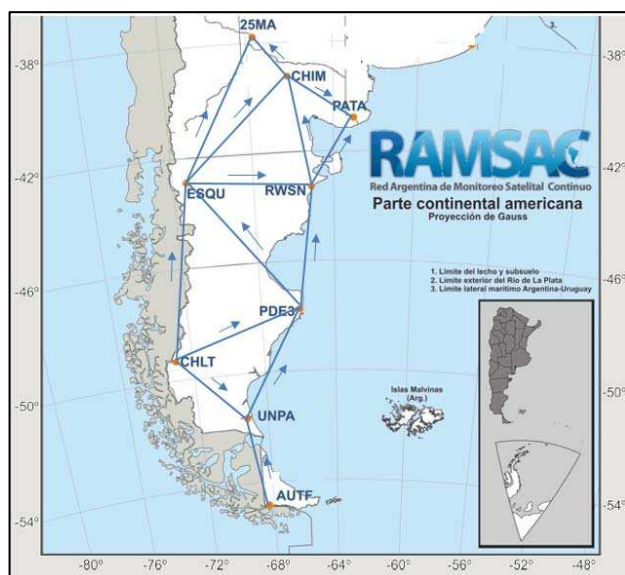


Figura 57 - Posicionamento relativo na Argentina. As setas indicam o sentido do vetor linha de base.

Fonte: adaptado de <http://ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/Mapa> - acesso em 11/2015.

Tabela 52 - Estações de controle e de interesse empregadas no posicionamento relativo na Argentina.

Identificador da linha de base	Estações de Controle	Rover	Distância aproximada (Km)
1	AUTF	UNPA	360,023
	CHLT		365,883
2	UNPA	PDE3	544,647
	CHLT		494,034
3	PDE3	ESQU	723,740
	CHLT		684,931
4	PDE3	RWSN	499,158
	ESQU		507,529
5	RWSN	CHIM	467,327
	ESQU		602,265
6	RWSN	PATA	328,550
	CHIM		324,899
7	CHIM	25MA	206,440
	ESQU		647,972

4.2.1 Resultados e análise.

Os resultados do processamento das observáveis GPS no LGO e os sigmas (desvios padrão) apresentados nas Tabelas 53 e 54 foram utilizados neste experimento nos cenários 1 e 2.

Na Tabela 53 estão apresentadas as componentes vetoriais das linhas de base obtidas para os sete transportes de coordenadas realizados no Brasil.

Tabela 53 - Componentes vetoriais das linhas de base – Brasil.

TC	Estações de Controle	Rover	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Dij (m)	Sigmas (m)
1	RSAL	RSPE	192692,516	280607,843	-191656,731	390644,941	0,039
	POAL		-158398,496	661,432	-164336,407	228247,619	0,023
2	RSAL	RSCL	131691,126	-16468,042	159686,024	207637,606	0,021
	POAL		-219399,878	-296414,452	187006,341	413484,226	0,042
3	RSCL	SCCH	202185,825	84061,443	98383,228	240051,439	0,024
	POAL		-17214,060	-212353,013	285389,578	356142,300	0,036
4	POAL	SCFL	279106,620	62677,855	240275,869	373579,325	0,038
	SCCH		296320,683	275030,869	-45113,707	406796,230	0,041
5	SCFL	UFPR	17125,535	-127413,014	212837,292	248650,503	0,025
	SCCH		313446,223	147617,862	167723,588	384929,564	0,039
6	SCCH	PRCV	-5653,572	-136731,365	216465,578	256095,247	0,026
	UFPR		-319099,800	-284349,222	48741,991	430180,129	0,043
7	PRCV	OURI	341068,298	154565,480	203952,176	426397,187	0,043
	UFPR		21968,503	-129783,747	252694,165	284922,406	0,029

Onde: TC – Transporte de Coordenadas.

O valor máximo para o comprimento dos vetores linhas de base disponíveis na Tabela 53 é de 430,180 km, mínimo de 207,637 km e valor médio de 331,982 km.

Na Tabela 54 estão apresentadas as componentes vetoriais das linhas de base obtidas para os sete transportes de coordenadas realizados no Argentina.

Tabela 54 - Componentes vetoriais das linhas de base – Argentina.

TC	Estações de Controle	Rover	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Dij (m)	Sigmas (m)
1	AUTF	UNPA	46793,985	-287059,279	212551,909	360237,451	0,0361
	CHLT		182296,154	272193,686	-162940,672	365883,797	0,0367
2	UNPA	PDE3	346436,970	-213820,295	279880,008	494034,930	0,0495
	CHLT		528733,127	58373,381	116939,326	544647,572	0,0545
3	PDE3	ESQU	-255920,821	-510949,740	377578,785	684931,268	0,0686
	CHLT		272812,291	-452576,359	494518,116	723740,335	0,0724
4	PDE3	RWSN	202823,626	-295997,948	346997,636	499158,860	0,0500
	ESQU		458744,439	214951,802	-30581,115	507529,252	0,0508
5	RWSN	CHIM	45613,992	-311683,125	345206,723	467327,174	0,0468
	ESQU		504358,420	-96731,293	314625,608	602265,416	0,0603
6	RWSN	PATA	239058,970	-90647,622	206347,465	328550,543	0,0330
	CHIM		193444,953	221035,448	-138859,295	324899,250	0,0326
7	CHIM	25MA	-88258,867	-142211,583	120845,913	206440,056	0,0209
	ESQU		416099,554	-238942,876	435471,518	647972,206	0,0649

Nas Tabelas 53 e 54 os sigmas foram calculados com base na expressão (127). O valor máximo para o comprimento dos vetores linhas de base disponíveis na Tabela 53 é de 723,740 km, mínimo de 206,440 km e valor médio de 206,440 km.

Na Tabela 55 encontram-se as coordenadas cartesianas geocêntricas referenciadas ao SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) das estações da RBMC empregadas neste experimento e disponíveis em seus descritivos.

Tabela 55 - Coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivos sigmas das estações localizadas no Brasil.

Estações	X (m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma_{X(m)}$	$\sigma_{Y(m)}$	$\sigma_{Z(m)}$
OURI	3785720,218	-4494897,632	-2471710,595	0,003	0,004	0,002
UFPR	3763751,679	-4365113,830	-2724404,714	0,002	0,003	0,002
SCFL	3746626,096	-4237700,774	-2937241,955	0,006	0,007	0,005
SCCH	3450305,443	-4512731,668	-2892128,267	0,003	0,004	0,003
RSPE	3309121,000	-4299717,184	-3341854,185	0,004	0,005	0,004
PRCV	3444651,922	-4649463,055	-2675662,745	0,004	0,006	0,003
RSAL	3116428,462	-4580324,953	-3150197,437	0,004	0,006	0,004
RSCL	3248119,581	-4596792,990	-2990511,434	0,005	0,006	0,004
POAL	3467519,403	-4300378,534	-3177517,731	0,001	0,001	0,001

Fonte: IBGE (2015).

Na Tabela 56 estão disponíveis as coordenadas cartesianas geocêntricas referenciadas ao POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) das estações da RAMSAC as quais são encontradas em seus descritivos.

Tabela 56 - Coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivos sigmas das estações localizadas na Argentina.

Estações	X (m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma_{X(m)}$	$\sigma_{Y(m)}$	$\sigma_{Z(m)}$
UNPA	1407712,888	-3707517,148	-4978623,245	0,005	0,005	0,005
PDE3	1754149,882	-3921337,397	-4698743,147	0,005	0,005	0,005
CHLT	1225416,677	-3979710,762	-4815682,36	0,005	0,005	0,005
ESQU	1498229,059	-4432287,062	-4321164,278	0,005	0,005	0,005
CHIM	2002587,541	-4529018,275	-4006538,712	0,005	0,005	0,005
PATA	2196032,431	-4307982,861	-4145397,972	0,005	0,005	0,005
25MA	1914328,778	-4671229,804	-3885692,833	0,005	0,005	0,005
AUTF	1360918,894	-3420457,923	-5191175,211	0,005	0,005	0,005
RWSN	1956973,435	-4217335,32	-4351745,482	0,005	0,005	0,005

Fonte: IGN (2015).

A partir dos dados presentes nas Tabelas 53, 54, 55 e 56, os cenários 1 e 2 do experimento 2 puderam ser realizados. As coordenadas de interesse que foram estimadas no ajustamento são referentes às estações denominadas de Rover nas Tabelas 53 e 54. Salienta-se que essas coordenadas são conhecidas (determinadas pelo IBGE e IGN) o que possibilitou o cálculo das discrepâncias posicionais e de algumas estatísticas.

No cenário 1 foi considerado que as coordenadas cartesianas estimadas estejam nos referenciais e épocas oficiais adotados em cada país. Nota-se na prática que o procedimento descrito no cenário 1 é comumente realizado.

As coordenadas cartesianas das estações de interesse localizadas no Brasil e estimadas no ajustamento com base no cenário 1 estão disponibilizadas na Tabela 57.

Tabela 57 - Coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivos sigmas das estações localizadas no Brasil.

Estações	X (m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma_{X(m)}$	$\sigma_{Y(m)}$	$\sigma_{Z(m)}$
RSPE	3309120,925	-4299717,104	-3341854,146	0,019	0,019	0,019
RSCL	3248119,575	-4596792,993	-2990511,408	0,016	0,016	0,016
SCCH	3450305,386	-4512731,547	-2892128,189	0,022	0,022	0,022
SCFL	3746626,070	-4237700,734	-2937241,913	0,056	0,056	0,056
UFPR	3763751,642	-4365113,793	-2724404,668	0,011	0,011	0,011
PRCV	3444651,874	-4649463,038	-2675662,698	0,010	0,010	0,010
OURI	3785720,194	-4494897,576	-2471710,555	0,011	0,011	0,011

Na Tabela 58 encontram-se os resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping aplicados em cada transporte de coordenadas realizado no Brasil para o cenário 1.

Tabela 58 - Resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping a 5% de significância.

TC	Estação de interesse	V	$\hat{\sigma}_0^2$	Qui-quadrado				Data snooping
				$\chi^2_{v;\frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2_{\text{calc.}}$	$\chi^2_{v;1-\frac{\alpha}{2}}$	Resultado	Resultado
1	RSPE	3	0,95	0,22	2,84	9,34	Passou	Passou
2	RSCL	3	0,70	0,22	2,10	9,34	Passou	Passou
3	SCCH	3	1,18	0,22	3,54	9,34	Passou	Passou
4	SCFL	3	4,05	0,22	12,14	9,34	Não Passou	Passou
5	UFPR	3	0,28	0,22	0,83	9,34	Passou	Passou
6	PRCV	3	0,21	0,22	0,62	9,34	Passou	Passou
7	OURI	3	0,23	0,22	0,68	9,34	Passou	Passou

Sendo: V : graus de liberdade no ajustamento; e $\hat{\sigma}_0^2$: variância *a posteriori*.

O nível de significância de 5% para o teste data snooping retorna o nível de rejeição igual a 2,8 e, desse modo, os resíduos padronizados das componentes do vetor linha de base superiores a esse valor foram detectadas como outliers.

As coordenadas cartesianas geocêntricas das estações de interesse localizadas na Argentina e estimadas no ajustamento com base no cenário 1 estão disponibilizadas na Tabela 59.

Tabela 59 - Coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivos sigmas das estações localizadas na Argentina.

Estações	X (m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma_{X(m)}$	$\sigma_{Y(m)}$	$\sigma_{Z(m)}$
UNPA	1407712,855	-3707517,140	-4978623,169	0,087	0,087	0,087
PDE3	1754149,834	-3921337,415	-4698743,145	0,063	0,063	0,063
ESQ	1498229,017	-4432287,129	-4321164,306	0,044	0,044	0,044
RWSN	1956973,503	-4217335,303	-4351745,453	0,042	0,042	0,042
CHIM	2002587,446	-4529018,411	-4006538,726	0,038	0,038	0,038
PATA	2196032,450	-4307982,884	-4145398,012	0,042	0,042	0,042
25MA	1914328,668	-4671229,866	-3885692,795	0,018	0,018	0,018

Na Tabela 60 encontram-se os resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping aplicados em cada transporte de coordenadas realizado na Argentina no cenário 1.

Tabela 60 - Resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping a 5% de significância.

Estação de interesse	V	$\hat{\sigma}_0^2$	Qui-quadrado				Data snooping
			$\chi^2_{v;\frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2_{\text{calc.}}$	$\chi^2_{v;1-\frac{\alpha}{2}}$	Resultado	Resultado
UNPA	3	11,20	0,22	33,60	9,34	Não Passou	Passou
PDE3	3	2,94	0,22	8,82	9,34	Passou	Passou
ESQ	3	0,76	0,22	2,94	9,34	Passou	Passou
RWSN	3	1,37	0,22	4,12	9,34	Passou	Passou
CHIM	3	1,07	0,22	3,2	9,34	Passou	Passou
PATA	3	3,18	0,22	9,54	9,34	Não Passou	Passou
25MA	3	0,81	0,22	2,43	9,34	Passou	Passou

Com base nas informações contidas nas Tabelas 58 e 60, verifica-se que o ajustamento das componentes vetoriais das linhas de base para a estimação das coordenadas das estações SCFL, UNPA e PATA não passaram no teste Qui-quadrado a 5% de significância, mas passaram no teste data snooping. Poderia tentar melhorar a qualidade da determinação desses vetores linhas de base e realizar um reajustamento, contudo, este procedimento não foi realizado.

Nas Tabelas 61 e 62, encontram-se, respectivamente, as coordenadas (em metros - m) e velocidades (m/ano) das estações (de controle e de interesse) localizadas no Brasil e Argentina disponíveis nas Tabelas 55 e 56 e transformadas e atualizadas, respectivamente, para o IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) com base no aplicativo computacional GEO_TRANSF_REF_ATUALI. Salienta-se que as velocidades foram obtidas com base no modelo de movimento ITRF2000 para a placa SOAM.

Tabela 61 - Coordenadas e velocidades cartesianas das estação da RBMC.

Estações	X(m)	Y(m)	Z(m)	$V_{X(m/ano)}$	$V_{Y(m/ano)}$	$V_{Z(m/ano)}$
OURI	3785720,208	-4494897,710	-2471710,387	0,000	-0,006	0,013
UFPR	3763751,676	-4365113,913	-2724404,508	0,000	-0,006	0,013
SCFL	3746626,099	-4237700,862	-2937241,752	0,000	-0,006	0,012
SCCH	3450305,442	-4512731,751	-2892128,064	0,000	-0,006	0,012
RSPE	3309121,011	-4299717,275	-3341853,988	0,001	-0,007	0,012
PRCV	3444651,916	-4649463,133	-2675662,540	0,000	-0,006	0,013
RSAL	3116428,467	-4580325,037	-3150197,239	0,001	-0,006	0,012
RSCL	3785720,208	-4494897,710	-2471710,387	0,000	-0,006	0,013
POAL	3763751,676	-4365113,913	-2724404,508	0,000	-0,006	0,013

Tabela 62 - Coordenadas e velocidades cartesianas das estação da RAMSAC.

Estações	X(m)	Y(m)	Z(m)	$V_{X(m/ano)}$	$V_{Y(m/ano)}$	$V_{Z(m/ano)}$
UNPA	1407712,918	-3707517,210	-4978623,176	0,004	-0,007	0,007
PDE3	1754149,907	-3921337,458	-4698743,072	0,003	-0,007	0,007
CHLT	1225416,704	-3979710,821	-4815682,291	0,003	-0,007	0,007
ESQU	1498229,077	-4432287,117	-4321164,201	0,002	-0,007	0,008
CHIM	2002587,554	-4529018,329	-4006538,628	0,002	-0,007	0,009
PATA	2196032,447	-4307982,918	-4145397,888	0,002	-0,007	0,008
25MA	1914328,789	-4671229,856	-3885692,748	0,001	-0,006	0,009
AUTF	1407712,918	-3707517,210	-4978623,176	0,004	-0,007	0,007
RWSN	1754149,907	-3921337,458	-4698743,072	0,003	-0,007	0,007

É importante frisar que as precisões das estações de controle empregadas no ajustamento são as mesmas disponíveis nos descritivos das estações, mas não implica necessariamente que as precisões das coordenadas estimadas sejam as mesmas. Para a determinação das precisões das coordenadas nos referenciais destinos é necessário realizar propagação de variâncias nos processos envolvidos e como alguns modelos de velocidade não possuem as incertezas associadas, optou-se por não realizar a propagação de variância. Por isso, as análises com base nas discrepâncias posicionais foram realizadas.

Na Tabela 63 encontram-se as coordenadas referenciadas ao IGB08 (ITRF2008, época 2015,954) das estações de interesse obtidas no ajustamento.

Tabela 63 - Coordenadas e respectivos sigmas para estações da RBMC.

Estações	X (m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma_{X(m)}$	$\sigma_{Y(m)}$	$\sigma_{Z(m)}$
RSPE	3309120,932	-4299717,192	-3341853,946	0,019	0,019	0,019
RSCL	3248119,580	-4596793,078	-2990511,209	0,015	0,016	0,015
SCCH	3450305,388	-4512731,632	-2892127,988	0,021	0,021	0,021
SCFL	3746626,074	-4237700,820	-2937241,712	0,053	0,053	0,053
UFPR	3763751,643	-4365113,879	-2724404,465	0,010	0,010	0,010

PRCV	3444651,872	-4649463,121	-2675662,494	0,009	0,010	0,009
OURI	3785720,190	-4494897,658	-2471710,350	0,011	0,011	0,011

Na Tabela 64 encontram-se os resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping para os ajustamentos realizados para estimação das coordenadas das estações de interesse localizadas no Brasil.

Tabela 64 - Resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping a 5% de significância.

Estação de interesse	$\mathfrak{U}$	$\hat{\sigma}_0^2$	Qui-quadrado				Data snooping
			$\chi^2_{v;\frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2_{\text{calc.}}$	$\chi^2_{v;1-\frac{\alpha}{2}}$	Resultado	Resultado
RSPE	3	0,89	0,22	2,68	9,34	Passou	Passou
RSCL	3	0,65	0,22	1,95	9,34	Passou	Passou
SCCH	3	1,04	0,22	3,11	9,34	Passou	Passou
SCFL	3	3,64	0,22	10,93	9,34	Não Passou	Passou
UFPR	3	0,22	0,22	0,67	9,34	Passou	Passou
PRCV	3	0,18	0,22	0,54	9,34	Passou	Passou
OURI	3	0,21	0,22	0,62	9,34	Passou	Passou

As coordenadas das estações de interesse no IGB08 (ITRF2008, época 2015, 594) foram transformadas e atualizadas para os SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) com base nos parâmetros do IERS e no modelo de velocidade ITRF2000. Ressalta-se aqui que o emprego deste modelo de velocidade foi utilizado para exemplificação dos cálculos. O mesmo procedimento foi realizado para os 18 modelos de velocidades restantes, porém foram apresentados apenas os resultados das discrepâncias posicionais e de algumas estatísticas.

A Tabela 65 contém coordenadas e velocidades em SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) obtidas para as estações de interesse localizadas no Brasil.

Tabela 65 - Coordenadas e velocidades das estações de interesse da RBMC.

Estações	X(m)	Y(m)	Z(m)	$V_X(\text{m/ano})$	$V_Y(\text{m/ano})$	$V_Z(\text{m/ano})$
RSPE	3309120,915	-4299717,098	-3341854,112	0,002	-0,007	0,008
RSCL	3248119,574	-4596792,992	-2990511,379	0,001	-0,007	0,008
SCCH	3450305,383	-4512731,545	-2892128,160	0,001	-0,007	0,008
SCFL	3746626,065	-4237700,729	-2937241,885	0,001	-0,007	0,008
UFPR	3763751,640	-4365113,792	-2724404,640	0,001	-0,007	0,009
PRCV	3444651,873	-4649463,038	-2675662,669	0,001	-0,006	0,009
OURI	3785720,193	-4494897,576	-2471710,527	0,000	-0,006	0,009

As coordenadas cartesianas presentes na Tabela 65 foram convertidas para coordenadas geodésicas e pôde-se calcular as discrepâncias posicionais.

Na Tabela 66 encontram-se as coordenadas no IGB08 (ITRF2008, época 2015,954) das estações de interesse obtidas no ajustamento para as estações da RAMSAC.

Tabela 66 - Coordenadas e respectivos sigmas para estações da RAMSAC.

Estações	X (m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma_{X(m)}$	$\sigma_{Y(m)}$	$\sigma_{Z(m)}$
UNPA	1407712,886	-3707517,202	-4978623,102	0,089	0,089	0,089
PDE3	1754149,863	-3921337,476	-4698743,076	0,064	0,064	0,064
ESQ	1498229,043	-4432287,189	-4321164,234	0,042	0,042	0,042
RWSN	1956973,525	-4217335,361	-4351745,377	0,044	0,044	0,044
CHIM	2002587,465	-4529018,468	-4006538,647	0,038	0,038	0,038
PATA	2196032,466	-4307982,940	-4145397,929	0,042	0,042	0,042
25MA	1914328,681	-4671229,920	-3885692,711	0,018	0,018	0,018

Na Tabela 67 encontram-se os resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping aplicados em cada transporte de coordenadas realizado na Argentina.

Tabela 67 - Resultados dos testes Qui-quadrado e data snooping a 5% de significância.

Estação de interesse	ν	$\hat{\sigma}_0^2$	Qui-quadrado				Data snooping
			$\chi^2_{\nu; \frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2_{\text{calc.}}$	$\chi^2_{\nu; 1-\frac{\alpha}{2}}$	Resultado	Resultado
UNPA	3	11,8	0,22	35,36	9,34	Não Passou	Passou
PDE3	3	3,01	0,22	9,03	9,34	Passou	Passou
ESQ	3	0,72	0,22	2,14	9,34	Passou	Passou
RWSN	3	1,50	0,22	4,50	9,34	Passou	Passou
CHIM	3	1,07	0,22	3,20	9,34	Passou	Passou
PATA	3	3,18	0,22	9,53	9,34	Não Passou	Passou
25MA	3	0,74	0,22	2,23	9,34	Passou	Passou

As coordenadas das estações de interesse no IGB08 (ITRF2008, época 2015, 594) foram transformadas e atualizadas para o POSGAR07 (ITF2005, época 2006,632) com base nos parâmetros do IERS e no modelo de velocidade ITRF2000.

A Tabela 68 contém coordenadas e velocidades no POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) obtidas para as estações de interesse localizadas na Argentina.

Tabela 68 - Coordenadas e velocidades das estações de interesse.

Estações	X(m)	Y(m)	Z(m)	$V_{X(m/ano)}$	$V_{Y(m/ano)}$	$V_{Z(m/ano)}$
UNPA	1407712,853	-3707517,140	-4978623,170	0,004	-0,007	0,007
PDE3	1754149,835	-3921337,415	-4698743,151	0,004	-0,007	0,007
ESQ	1498229,023	-4432287,135	-4321164,312	0,003	-0,007	0,008
RWSN	1956973,503	-4217335,303	-4351745,457	0,003	-0,007	0,008
CHIM	2002587,449	-4529018,414	-4006538,731	0,002	-0,007	0,009
PATA	2196032,447	-4307982,883	-4145398,013	0,003	-0,007	0,008
25MA	1914328,668	-4671229,868	-3885692,796	0,002	-0,006	0,009

As coordenadas e velocidades na época e no sistema de referência destino deverão ser disponibilizadas para que seja possível recuperar as coordenadas e velocidades na época e referência de origem. Assim, caso as coordenadas no referencial destino forem empregadas com os modelos utilizados a priori, as velocidades obtidas nesse referencial não serão as mesmas e os procedimentos de ida e volta da transformação e atualização não se coincidem.

Nos transportes de coordenadas, no Brasil, considerando as coordenadas das estações de controle compatibilizadas com o referencial e época das efemérides precisas IGS não houve alteração nos resultados dos testes estatísticos para detecção e localização de outliers, embora tenha ocorrido sutil alteração na variância a posteriori.

Nos transportes de coordenadas realizados na Argentina houve alteração nos resultados dos testes estatísticos em alguns casos. Conforme apresentado na Tabela 67 e já mencionado anteriormente, houve rejeição da hipótese de igualdade estatística das variâncias a priori e a posteriori a 5% de significância na estimação das coordenadas das estações UNPA e PATA considerando-se a atualização das coordenadas o modelo ITRF2000. O uso dos modelos APKIM2005D, NNR-MORVEL56, Perez, Monico e Chaves (2003) e GSRM V.2.1 ocasionaram aprovação no teste Qui-quadrado na estimação da estação PATA. Por outro lado, o emprego do modelo desenvolvido por Costa, Santos e Gemaél (2003) levou a não aprovação nesse teste na estimação das coordenadas da estação PDE.

A partir do conhecimento das coordenadas cartesianas das estações de interesse obtidas do ajustamento de observações foi empregado o programa GEO_TRANSF_REF_ATUALI para estimação das velocidades dessas estações com base nos 18 modelos de velocidades restantes, realização da mudança de referencial das coordenadas e velocidades e atualização posicional. Esse programa fornece as coordenadas geodésicas (latitude, longitude, altitude elipsoidal) das coordenadas no referencial e época destinos e a partir dessas pôde-se realizar as comparações necessárias.

A Figura 58 ilustra os boxplots das discrepâncias planimétricas (D2D) obtidas com base no emprego dos parâmetros do IERS e dos 19 modelos de movimento para a placa SOAM na determinação posicional das estações de interesse no Brasil.

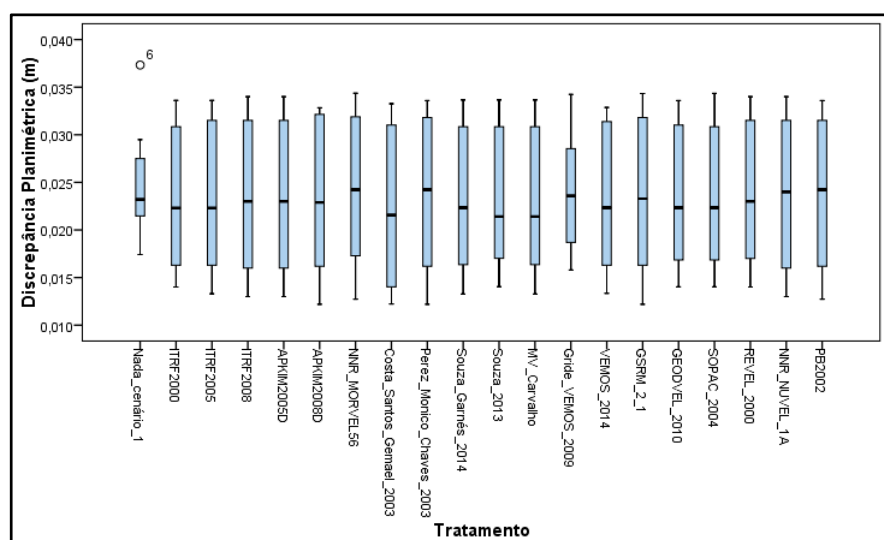


Figura 58 - Boxplots das discrepâncias planimétricas em função do tratamento.

Na Figura 58, observa-se um outlier para o cenário 1. A discrepância planimétrica para esta estação foi detectada devido ao valor estar compreendido entre o 1,5 a 3,0 vezes o desvio interquartilico (DIQ). Os menores desvios interquartilicos foram obtidos com base no cenário 1 e a grade do VEMOS2009.

Na Tabela 69 encontram-se algumas estatísticas das discrepâncias para latitude, longitude e discrepância planimétrica obtidas com base nos transportes de coordenadas realizados no Brasil.

Tabela 69 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais com base nos sete transportes de coordenadas no Brasil.

Tratamentos	Discrepâncias (m)	Estatísticas (m)					
		Média	Mediana	Máximo	Mínimo	AT	RMS
Nada (Cenário 1)	latitude	0,012	0,016	0,024	-0,023	0,048	0,019
	longitude	0,001	-0,004	0,028	-0,028	0,056	0,017
	D2D	0,025	0,023	0,037	0,017	0,020	0,026
ITRF2000	latitude	0,007	0,009	0,022	-0,029	0,051	0,017
	longitude	0,003	-0,001	0,031	-0,025	0,056	0,018
	D2D	0,024	0,022	0,034	0,014	0,020	0,025
ITRF2005	latitude	0,007	0,009	0,022	-0,030	0,052	0,017
	longitude	0,003	-0,001	0,031	-0,025	0,056	0,018
	D2D	0,024	0,022	0,034	0,013	0,020	0,025
ITRF2008	latitude	0,007	0,009	0,022	-0,029	0,051	0,017
	longitude	0,003	-0,001	0,032	-0,025	0,057	0,018
	D2D	0,024	0,023	0,034	0,013	0,020	0,025
APKIM2005 (DGFI)	latitude	0,007	0,009	0,023	-0,029	0,052	0,017
	longitude	0,003	0,000	0,032	-0,025	0,057	0,019
	D2D	0,024	0,023	0,034	0,013	0,022	0,025
APKIM2008D	latitude	0,006	0,008	0,022	-0,030	0,052	0,017
	longitude	0,004	0,000	0,032	-0,024	0,056	0,018

	D2D	0,024	0,023	0,033	0,012	0,021	0,025
NNR-MORVEL56	latitude	0,007	0,009	0,024	-0,029	0,053	0,018
	longitude	0,004	0,000	0,032	-0,024	0,056	0,019
	D2D	0,024	0,024	0,034	0,013	0,022	0,026
Costa, Santos e Gemaél (2003)	latitude	0,004	0,008	0,017	-0,032	0,049	0,016
	longitude	0,004	-0,001	0,032	-0,025	0,057	0,018
	D2D	0,022	0,022	0,033	0,012	0,021	0,024
Perez, Monico e Chaves (2003)	latitude	0,006	0,009	0,023	-0,029	0,052	0,017
	longitude	0,004	0,000	0,032	-0,024	0,056	0,019
	D2D	0,024	0,024	0,034	0,012	0,021	0,025
Souza e Garnés (2014)	latitude	0,007	0,009	0,021	-0,029	0,050	0,017
	longitude	0,003	-0,002	0,031	-0,026	0,057	0,018
	D2D	0,023	0,022	0,034	0,013	0,020	0,025
Souza (2013)	latitude	0,007	0,010	0,021	-0,029	0,050	0,017
	longitude	0,002	-0,002	0,031	-0,026	0,057	0,018
	D2D	0,024	0,021	0,034	0,014	0,020	0,025
MV_Carvalho	latitude	0,007	0,009	0,021	-0,029	0,050	0,017
	longitude	0,003	-0,002	0,031	-0,026	0,057	0,018
	D2D	0,023	0,021	0,034	0,013	0,020	0,025
Grade_VEMOS2009	latitude	0,008	0,014	0,018	-0,024	0,042	0,016
	longitude	0,004	0,002	0,032	-0,029	0,061	0,019
	D2D	0,024	0,024	0,034	0,016	0,018	0,025
VEMOS2014	latitude	0,006	0,009	0,021	-0,030	0,051	0,017
	longitude	0,003	-0,001	0,031	-0,025	0,056	0,018
	D2D	0,023	0,022	0,033	0,013	0,020	0,025
GSRM 2.1 (2014)	latitude	0,006	0,009	0,023	-0,029	0,052	0,017
	longitude	0,003	-0,001	0,032	-0,025	0,057	0,019
	D2D	0,024	0,023	0,034	0,012	0,022	0,025
NNR GEODVEL2010 (2010)	latitude	0,007	0,009	0,022	-0,029	0,051	0,017
	longitude	0,003	-0,001	0,031	-0,025	0,056	0,018
	D2D	0,024	0,022	0,034	0,014	0,020	0,025
SOPAC(2004)	latitude	0,007	0,009	0,022	-0,029	0,051	0,017
	longitude	0,003	-0,001	0,031	-0,026	0,057	0,018
	D2D	0,024	0,022	0,034	0,014	0,020	0,025
REVEL2000	latitude	0,007	0,010	0,022	-0,029	0,051	0,017
	longitude	0,003	-0,001	0,032	-0,025	0,057	0,018
	D2D	0,024	0,023	0,034	0,014	0,020	0,025
NNR - NUVEL1A	latitude	0,007	0,009	0,023	-0,029	0,052	0,017
	longitude	0,004	0,000	0,032	-0,024	0,056	0,018
	D2D	0,024	0,024	0,034	0,013	0,021	0,025
PB2002	latitude	0,007	0,009	0,023	-0,029	0,052	0,017
	longitude	0,004	0,000	0,032	-0,024	0,056	0,018
	D2D	0,024	0,024	0,034	0,013	0,021	0,025

No cenário 1, a média e o RMS das discrepâncias planimétricas foram, respectivamente, iguais a 0,025 m e 0,026 m. O valor máximo da média das discrepâncias planimétricas para o emprego dos diferentes modelos no cenário 2 foi de 0,024 m e o valor mínimo foi de 0,022, resultando em uma AT de 0,002 m. Em relação ao RMS das

discrepâncias planimétricas, o valor máximo foi de 0,026 m e mínimo de 0,024 m. Portanto, as diferenças máximas encontradas para a média e o RMS das discrepâncias planimétricas nos cenários 1 e 2 foram, respectivamente, iguais a 0,003 m e 0,002 m.

Considerando os resultados obtidos com os 7 (sete) transportes de coordenadas, o modelo que proporcionou melhor resultado para a média e o RMS das discrepâncias planimétrica foi o modelo de movimento de Costa, Santos e Gemael (2003), muito diferente do que foi encontrado no experimento 1, pois foi detectado como o modelo que apresentou maior valor para as discrepâncias posicionais. Portanto, devido as diferenças milimétricas encontradas pode-se dizer que não foi detectado ganho com a compatibilização de referencial e época no posicionamento relativo no experimento realizado no Brasil.

A Figura 59 ilustra os boxplots das discrepâncias planimétricas (D2D) obtidas com base no emprego dos parâmetros do IERS e dos 19 modelos de movimento para a placa SOAM na determinação posicional das estações de interesse na Argentina.

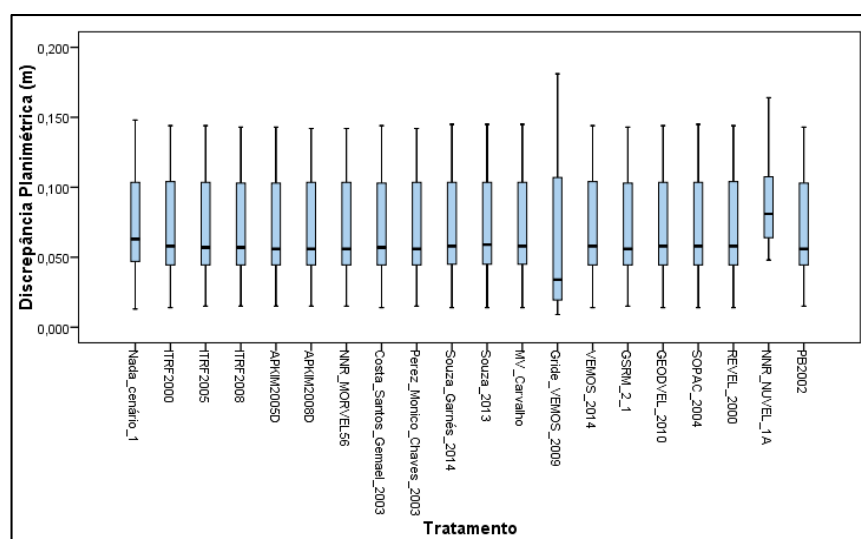


Figura 59 - Boxplots das D2D em função do tratamento.

Na Figura 59 não se observa a presença de outliers e pontos extremos. O maior DIQ foi obtido no cenário 2 com base no uso da grade do VEMOS2009 além de ter apresentado maior valor para a D2D.

Na Tabela 70, encontram-se algumas estatísticas das discrepâncias para latitude, longitude e discrepância planimétrica obtidas com base nos transportes de coordenadas realizados na Argentina.

Tabela 70 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais com base nos sete transportes de coordenadas na Argentina.

Tratamentos	Discrepâncias (m)	Estatísticas					
		Média	Mediana	Máximo	Mínimo	AT	RMS
Nada (Cenário 1)	latitude	0,021	0,030	0,043	-0,011	0,054	0,029
	longitude	-0,047	-0,051	0,069	-0,142	0,211	0,083
	D2D	0,075	0,063	0,148	0,013	0,135	0,088
ITRF2000	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,012	0,054	0,028
	longitude	-0,045	-0,048	0,071	-0,137	0,209	0,081
	D2D	0,073	0,058	0,144	0,014	0,129	0,086
ITRF2005	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,045	-0,048	0,071	-0,137	0,209	0,080
	D2D	0,073	0,057	0,144	0,015	0,128	0,085
ITRF2008	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,044	-0,048	0,071	-0,137	0,208	0,080
	D2D	0,073	0,057	0,143	0,015	0,128	0,085
APKIM2005 (DGFI)	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,044	-0,047	0,071	-0,137	0,208	0,080
	D2D	0,073	0,056	0,143	0,015	0,128	0,085
APKIM2008D	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,044	-0,047	0,072	-0,136	0,208	0,080
	D2D	0,073	0,056	0,142	0,015	0,127	0,085
NNR-MORVEL56	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,044	-0,047	0,072	-0,136	0,208	0,080
	D2D	0,073	0,056	0,142	0,015	0,127	0,085
Costa, Santos e Gemael (2003)	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,012	0,054	0,028
	longitude	-0,045	-0,048	0,071	-0,137	0,209	0,080
	D2D	0,073	0,057	0,144	0,014	0,129	0,085
Perez, Monico e Chaves (2003)	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,044	-0,047	0,072	-0,136	0,208	0,080
	D2D	0,073	0,056	0,142	0,015	0,127	0,085
Souza e Garnés (2014)	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,012	0,054	0,028
	longitude	-0,045	-0,049	0,071	-0,138	0,209	0,081
	D2D	0,073	0,058	0,145	0,014	0,131	0,086
Souza (2013)	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,012	0,054	0,028
	longitude	-0,045	-0,049	0,071	-0,138	0,209	0,081
	D2D	0,074	0,059	0,145	0,014	0,131	0,086
MV_Carvalho	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,012	0,054	0,028
	longitude	-0,045	-0,049	0,071	-0,138	0,209	0,081
	D2D	0,073	0,058	0,145	0,014	0,131	0,086
Grade_VEMOS2009	latitude	0,023	0,027	0,052	-0,008	0,060	0,032
	longitude	-0,042	-0,009	0,057	-0,173	0,230	0,088
	D2D	0,068	0,034	0,181	0,009	0,172	0,093
VEMOS2014	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,012	0,054	0,028
	longitude	-0,045	-0,048	0,071	-0,137	0,209	0,081
	D2D	0,073	0,058	0,144	0,014	0,129	0,086
GSRM 2.1 (2014)	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,044	-0,047	0,071	-0,137	0,208	0,080
	D2D	0,073	0,056	0,143	0,015	0,128	0,085
	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,012	0,054	0,028

NNR GEODVEL2010	longitude	-0,045	-0,048	0,071	-0,137	0,209	0,081
	D2D	0,073	0,058	0,144	0,014	0,129	0,085
SOPAC(2004)	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,012	0,054	0,028
	longitude	-0,045	-0,048	0,071	-0,138	0,209	0,081
	D2D	0,073	0,058	0,145	0,014	0,131	0,086
REVEL2000	latitude	0,020	0,028	0,042	-0,012	0,054	0,028
	longitude	-0,045	-0,048	0,071	-0,137	0,209	0,081
	D2D	0,073	0,058	0,144	0,014	0,129	0,086
NNR - NUVEL1A	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,044	-0,047	0,071	-0,137	0,208	0,080
	D2D	0,073	0,056	0,143	0,015	0,128	0,085
PB2002	latitude	0,020	0,027	0,042	-0,013	0,056	0,028
	longitude	-0,044	-0,047	0,071	-0,137	0,208	0,080
	D2D	0,073	0,056	0,143	0,015	0,128	0,085

No cenário 1, a média e o RMS_{D2D} foram, respectivamente, iguais a 0,075 m e 0,088 m. O valor máximo da média das discrepâncias planimétricas para o emprego dos diferentes modelos no cenário 2 foi de 0,074 m e o valor mínimo foi de 0,068 m, resultando na diferença máxima de 0,006 m. Em relação ao RMS das discrepâncias planimétricas, o valor máximo foi de 0,093 m e mínimo de 0,085 m, resultando na diferença máxima de 0,008 m. Portanto, as diferenças máximas encontradas para a média e o RMS das discrepâncias planimétricas nos cenários 1 e 2 foram, respectivamente, iguais a 0,007 m e 0,003 m. Considerando os resultados obtidos com os 7 (sete) transportes de coordenadas, o modelo que proporcionou melhor resultado para a média e o RMS das discrepâncias planimétrica foi Grade_VEMOS2009 (0,068 m) e o pior resultado foi obtido no cenário 1 (0,075 m). Contudo, realizando a análise com base no RMS das discrepâncias planimétricas, o menor valor (0,085 m) foi encontrado com uso dos modelos de velocidades Perez, Monico e Chaves (2003), APKIM2008DD, NNR-MORVEL56, APKIM2005D, GSRM v.2.1, NNR-NUVEL1A, PB2002, ITRF2008, Costa, Santos e Gemael (2003), ITRF2005 e GEODVEL2010 e o modelo que apresentou maior valor (0,093 m) foi Grade_VEMOS2009. Os modelos ITRF2000, VEMOS2014, REVEL2000, SOPAC2004, Souza e Garnés (2014), MV_Carvalho e Souza (2013) apresentaram valores iguais a 0,086 m.

Com intuito de realizar mais análises relacionada à compatibilização de referencial e época no posicionamento na Argentina foram selecionadas 28 estações da rede RAMSAC que pertencem à rede SIRGAS-CON e possuem coordenadas em ambos referenciais e épocas (IGb08 (ITRF2008, época 2015,594) e POSGAR07 (ITRF2005, época 206,632)). As estações são: ALUM, AUTF, AZUL, BCAR, CATA, CHAC,

CORD, EBYP, ESQU, IGM1, JBAL, LPGS, MPL2, PEJO, PRNA, RECO, RIO2, RWSN, SVIC, TERO, TUCU, UCOR, UNPA, UNRO, UNSA, UNSJ, VBCA e YEMA.

As coordenadas semanais dessas estações no IGB08 (ITRF2008) e no POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632 foram obtidas nos endereços 1²⁸ e 2²⁹.

As Tabelas 71 e 72 apresentam as coordenadas cartesianas geocêntricas das estações da solução SIR15P1856 e velocidades calculadas com o modelo de velocidade ITRF2000.

Tabela 71 - Coordenadas e velocidades no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).

Estações	Coordenadas			Velocidades		
	X (m)	Y(m)	Z (m)	Vx (m/ano)	Vy (m/ano)	Vz (m/ano)
ALUM	2253309,665	-5206250,785	-2911357,275	0,000	-0,005	0,010
AUTF	1360918,993	-3420457,980	-5191175,140	0,004	-0,008	0,006
AZUL	2566993,102	-4424962,863	-3796807,665	0,002	-0,007	0,009
BCAR	2652930,053	-4295643,532	-3884618,409	0,002	-0,007	0,009
CATA	2302597,679	-5117329,069	-3022751,210	0,000	-0,006	0,010
CHAC	2921442,759	-4854358,583	-2919683,273	0,000	-0,006	0,010
CORD	2345503,877	-4910842,889	-3316365,267	0,001	-0,006	0,009
EBYP	3178529,890	-4693288,173	-2914645,338	0,000	-0,006	0,010
ESQU	1498229,061	-4432287,124	-4321164,191	0,002	-0,007	0,008
IGM1	2751804,036	-4479879,376	-3598922,423	0,002	-0,007	0,009
JBAL	2335115,599	-5153171,459	-2935953,093	0,000	-0,006	0,010
LPGS	2780102,996	-4437419,000	-3629404,406	0,002	-0,007	0,009
MPL2	2698449,995	-4247372,268	-3905981,290	0,002	-0,007	0,009
PEJO	2439651,960	-4568033,394	-3710849,198	0,002	-0,007	0,009
PRNA	2674872,283	-4721942,447	-3339902,700	0,001	-0,006	0,010
RECO	2815740,486	-4811702,282	-3088116,270	0,001	-0,006	0,010
RIO2	1429907,859	-3495354,891	-5122698,550	0,004	-0,008	0,006
RWSN	1956973,503	-4217335,416	-4351745,391	0,003	-0,007	0,008
SVIC	3303870,033	-4629721,677	-2877845,952	0,000	-0,006	0,010
TERO	2452644,498	-5086396,517	-2955957,158	0,000	-0,006	0,010
TUCU	2386117,207	-5171223,297	-2862949,000	0,000	-0,005	0,010
UCOR	2371430,037	-4904120,035	-3307377,358	0,001	-0,006	0,009
UNPA	1407712,963	-3707517,251	-4978623,174	0,004	-0,007	0,007
UNRO	2627448,182	-4668383,237	-3450213,398	0,001	-0,006	0,010
UNSA	2412830,458	-5271936,779	-2652208,924	0,000	-0,005	0,010
UNSJ	1987485,086	-5065493,369	-3317557,399	0,001	-0,006	0,009
VBCA	2319240,781	-4411744,023	-3966483,996	0,002	-0,007	0,009
YEMA	2799305,098	-5099610,979	-2606734,126	0,000	-0,005	0,010

É importante ressaltar que as velocidades disponíveis na Tabela 71 foram calculadas com uso das coordenadas no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) e o emprego

²⁸ http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/SIRGAS_CRD/sir15P1856.crd

²⁹ <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/Mapa>.

do modelo ITRF2000 implementado no GEO_TRANSF_REF_ATUALI. Foi admitido que essas velocidades estejam no mesmo referencial das coordenadas utilizadas.

As velocidades e coordenadas cartesianas transformadas e atualizadas para o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) são fornecidas na Tabela 72.

Tabela 72 - Coordenadas e velocidades no POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632).

Estações	Coordenadas			Velocidades		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx (m/ano)	Vy (m/ano)	Vz (m/ano)
ALUM	2253309,667	-5206250,742	-2911357,369	0,000	-0,005	0,010
AUTF	1360918,955	-3420457,915	-5191175,205	0,005	-0,008	0,006
AZUL	2566993,089	-4424962,807	-3796807,755	0,002	-0,007	0,009
BCAR	2652930,038	-4295643,475	-3884618,498	0,002	-0,007	0,009
CATA	2302597,679	-5117329,025	-3022751,303	0,001	-0,006	0,010
CHAC	2921442,759	-4854358,536	-2919683,370	0,001	-0,006	0,010
CORD	2345503,872	-4910842,841	-3316365,359	0,001	-0,006	0,009
EBYP	3178529,889	-4693288,124	-2914645,437	0,001	-0,006	0,010
ESQU	1498229,041	-4432287,070	-4321164,268	0,003	-0,007	0,008
IGM1	2751804,026	-4479879,321	-3598922,515	0,002	-0,007	0,009
JBAL	2335115,600	-5153171,416	-2935953,188	0,000	-0,005	0,010
LP GS	2780102,985	-4437418,945	-3629404,498	0,002	-0,007	0,009
MPL2	2698449,980	-4247372,210	-3905981,379	0,002	-0,007	0,009
PEJO	2439651,949	-4568033,341	-3710849,288	0,002	-0,007	0,009
PRNA	2674872,277	-4721942,397	-3339902,794	0,001	-0,006	0,010
RECO	2815740,484	-4811702,234	-3088116,366	0,001	-0,006	0,010
RIO2	1429907,823	-3495354,827	-5122698,616	0,004	-0,008	0,006
RWSN	1956973,481	-4217335,358	-4351745,471	0,003	-0,007	0,008
SVIC	3303870,033	-4629721,628	-2877846,052	0,001	-0,006	0,010
TERO	2452644,498	-5086396,472	-2955957,253	0,000	-0,006	0,010
TUCU	2386117,209	-5171223,254	-2862949,095	0,000	-0,005	0,010
UCOR	2371430,032	-4904119,987	-3307377,450	0,001	-0,006	0,009
UNPA	1407712,930	-3707517,189	-4978623,243	0,004	-0,007	0,007
UNRO	2627448,174	-4668383,185	-3450213,491	0,001	-0,006	0,009
UNSA	2412830,463	-5271936,738	-2652209,021	0,000	-0,005	0,010
UNSJ	1987485,082	-5065493,324	-3317557,489	0,001	-0,006	0,009
VBCA	2319240,765	-4411743,967	-3966484,082	0,002	-0,007	0,009
YEMA	2799305,103	-5099610,937	-2606734,225	0,000	-0,005	0,010

Procedimento análogo foi realizado levando-se em consideração os 18 modelos de movimento para a placa SOAM restantes empregados nesta pesquisa. De posse das coordenadas geodésicas (latitude, longitude, altitude elipsoidal) calculadas no POSGAR07 (ITRF2005, época 206,632), as discrepâncias posicionais e algumas estatísticas foram calculadas, tomando como referência as coordenadas contidas nos descritivos das estações.

Na Tabela 73 encontram-se os valores dos RMS das discrepância sem termos de latitude, longitude, altitude elipsoidal, e resultantes planimétricas e tridimensionais.

Tabela 73 - RMS das discrepâncias posicionais.

Tratamentos	$\delta\phi$ (m)	$\delta\lambda$ (m)	δh (m)	D2D (m)	D3D (m)
*Nenhum	0,107	0,035	0,022	0,113	0,115
ITRF2000	0,016	0,031	0,016	0,035	0,039
ITRF2005	0,016	0,031	0,016	0,035	0,039
ITRF2008	0,017	0,031	0,017	0,036	0,039
APKIM2005D	0,021	0,035	0,016	0,041	0,044
APKIM2008D	0,016	0,032	0,016	0,036	0,040
NNR-MORVEL56	0,031	0,034	0,016	0,046	0,048
Costa, Santos e Gemael (2003)	0,084	0,044	0,016	0,095	0,096
Perez, Monico e Chaves (2003)	0,018	0,035	0,016	0,040	0,043
Souza e Garnés (2014)	0,015	0,031	0,016	0,034	0,038
Souza (2013)	0,015	0,031	0,016	0,034	0,038
MV_Carvalho (2015)	0,015	0,031	0,016	0,034	0,038
Grade_VEMOS2009	0,017	0,035	0,016	0,039	0,042
VEMOS 2014	0,016	0,031	0,016	0,035	0,038
GSRM_2.1	0,017	0,039	0,016	0,043	0,046
GEODVEL2010 (NNR)	0,020	0,031	0,018	0,037	0,041
SOPAC 2004	0,017	0,031	0,016	0,035	0,039
REVEL2000	0,019	0,033	0,016	0,038	0,042
NNR-NUVEL-1A	0,019	0,031	0,016	0,037	0,040
PB2002	0,019	0,031	0,016	0,037	0,040

Nota: foi empregado o termo tratamento pois em *Nenhum, não foi empregado modelo de velocidade e nem realizado a mudança de referencial das coordenadas.

A Figura 60 ilustra os valores dos RMS_{D2D} e RMS_{D3D} obtidos para os posicionamentos considerando e desconsiderando a diferença existente entre referenciais e épocas.

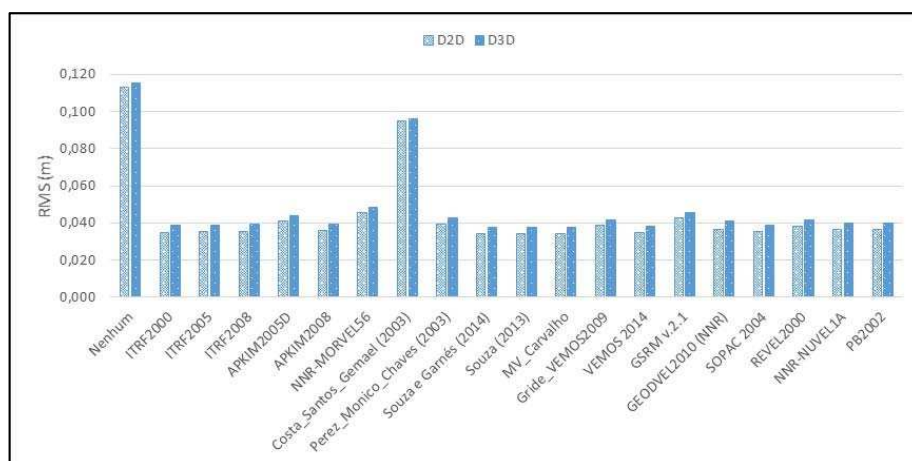


Figura 60 - RMS_{D2D} e RMS_{D3D} .

A Figura 60 permite visualizar que o fato de não se considerar a mudança de referencial e atualização de coordenadas não proporciona posicionamento geodésico acurado. Pode-se notar também que a depender da escolha do modelo de velocidade, conforme visto no experimento 1, afeta a determinação das coordenadas geodésicas.

Na Tabela 74 estão disponíveis os valores, em metros, dos RMS_{D2D} e RMS_{D3D} obtidos com o emprego de diferentes modelos de velocidade e os parâmetros de transformação do IERS.

Tabela 74 - RMS_{D2D} e RMS_{D3D} .

Tratamentos	Posição	RMS_{D2D}	RMS_{D3D}
Souza (2013)	1	0,034	0,038
MV_Carvalho	2	0,034	0,038
Souza e Garnés (2014)	3	0,034	0,038
VEMOS 2014	4	0,035	0,038
ITRF2000	5	0,035	0,039
ITRF2005	6	0,035	0,039
SOPAC 2004	7	0,035	0,039
ITRF2008	8	0,036	0,039
APKIM2008D	9	0,036	0,040
PB2002	10	0,037	0,040
NNR-NUVEL1A	11	0,037	0,040
GEODVEL2010 (NNR)	12	0,037	0,041
REVEL2000	13	0,038	0,042
Grade_VEMOS2009	14	0,039	0,042
Perez, Monico e Chaves (2003)	15	0,040	0,043
APKIM2005D	16	0,041	0,044
GSRM v.2.1	17	0,043	0,046
NNR-MORVEL56	18	0,046	0,049
Costa, Santos e Gemaél (2003)	19	0,095	0,096
Nenhum	20	0,113	0,115

Com este experimento, pôde-se verificar que a escolha do modelo de velocidade influencia a qualidade da determinação posicional.

No posicionamento relativo realizado neste experimento não foi detectado melhora no posicionamento realizado no Brasil e na Argentina, com a consideração a priori da mudança de referencial e atualização das coordenadas das estações de controle, utilizadas no ajustamento e posterior mudança de referencial e atualização das coordenadas das estações de interesse para o referencial e época adotado em cada país. Porém, considerando as coordenadas obtidas na solução semanal da rede SIRGAS-CON foi verificado a grande importância e a necessidade da mudança de referencial e a atualização das coordenadas.

Portanto, uma das aplicações imediatas da mudança de referencial e atualização das coordenadas seria quando do emprego do PPP (online ou não) e do posicionamento relativo com base no OPUS³⁰ (*Online Positioning User Service*) e no AUSPOS³¹ no

³⁰ <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>

³¹ <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>

referencial e época das efemérides e não permitem intervenção do usuário na escolha do referencial e época a serem adotadas no Brasil ou na Argentina. A exceção está no serviço IBGE-PPP o qual fornece as coordenadas no referencial e época oficial no Brasil.

No experimento 3 foi verificado a influência do emprego de diferentes modelos de velocidade para posicionamento em rede.

4.3 Experimento 3

O cenário 1 deste experimento foi realizado desconsiderando a diferença existente entre referenciais e épocas das coordenadas das estações de controle das redes geodésicas localizadas no Brasil e na Argentina. Nesse cenário, as coordenadas das estações de controle empregadas no ajustamento injuncionado são as disponíveis em seus descritivos.

No cenário 2, as coordenadas das estações de controle foram transformadas e atualizadas do SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e POSGAR07(ITRF2005, época 2006,632) para o IGB08 (ITRF2008, época 2015,594), antes de serem empregadas no ajustamento injuncionado. Após a execução deste procedimento, as coordenadas estimadas das estações de interesse no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) foram transformadas e atualizadas para os referenciais e épocas SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e POSGAR07(ITRF2005, época 2006,632). A mudança de referencial foi realizada com base nos parâmetros de transformação disponibilizados pelo IERS e a atualização das coordenadas foi realizada com base nos modelos utilizados anteriormente.

O processamento dos dados GPS para realização deste experimento foi realizado no software LGO para as observáveis coletadas nos dias 04/08/2015, 05/08/2015 e 06/08/2015 e emprego das efemérides precisas IGS. Todos os vetores linhas de base que ligam as estações das redes localizadas no Brasil e na Argentina resultantes desse processamento são independentes e estão referenciados no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594 – dia 05/08/2015).

Com base nas mesmas nove estações empregadas no experimento 2, foram estabelecidas duas redes, uma localizada no Brasil e outra na Argentina. Nas Figuras 61 e 62 é possível verificar as configurações geométricas dessas redes e as estações de controle (triângulos). As linhas contínuas e tracejadas referem-se às linhas de base independentes provenientes de duas sessões de observação GPS de 24h.

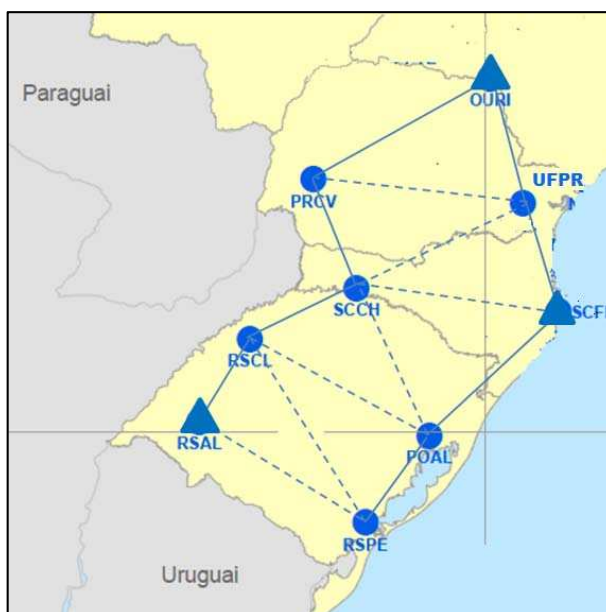


Figura 61 - Posicionamento relativo em rede no Brasil.

Fonte: Adaptado IBGE (2015).

A Tabela 75 contém informações da data da sessão de observação, dos vetores linha de base independentes e do comprimento aproximado desses vetores para a rede localizada no Brasil.

Tabela 75 - Linhas de base da rede GPS localizada no Brasil.

Sessão de observação	Data do arquivo de observação e das efemérides precisas IGS	Linhas de base		Distância aproximada (Km)
1	04/08/2015	RSAL	RSCL	207,638
1	04/08/2015	RSCL	SCCH	240,051
1	04/08/2015	SCCH	PRCV	256,095
1	04/08/2015	PRCV	OURI	426,397
1	04/08/2015	OURI	UFPR	284,922
1	04/08/2015	UFPR	SCFL	248,651
1	04/08/2015	SCFL	POAL	373,579
1	04/08/2015	POAL	RSPE	228,248
2	05/08/2015	RSAL	RSPE	390,645
2	05/08/2015	RSCL	RSPE	464,130
2	05/08/2015	RSCL	POAL	413,484
2	05/08/2015	SCCH	POAL	356,142
2	05/08/2015	SCCH	SCFL	406,796
2	05/08/2015	SCCH	UFPR	384,930
2	05/08/2015	PRCV	UFPR	430,180

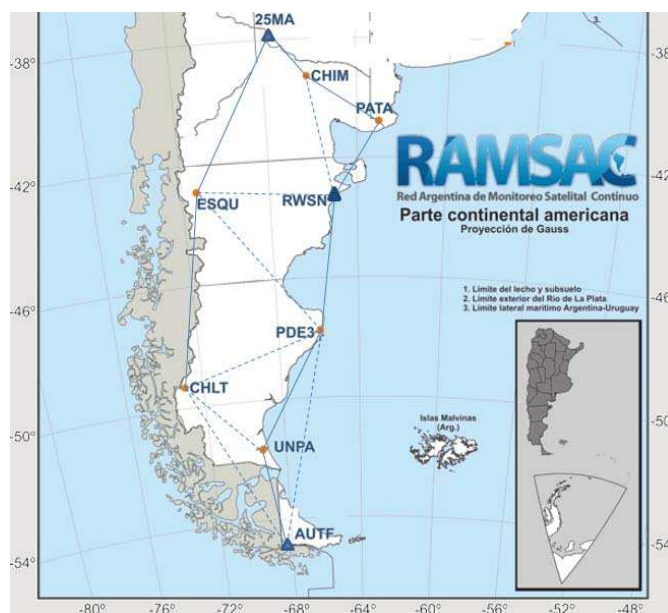


Figura 62 - Posicionamento relativo em rede na Argentina.

Fonte: adaptado de <http://ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/Mapa> - acesso em 11/2015

A Tabela 76 contém informações da data da sessão de observação, dos vetores linha de base independentes e do comprimento aproximado desses vetores para a rede localizada na Argentina.

Tabela 76 - Linhas de base da rede GPS localizada na Argentina.

Sessão de observação	Data do arquivo de observação e das efemérides precisas IGS	Linhas de Base (LB) Independente		Distância aproximada (Km)
1	04/08/2015	AUTF	UNPA	360,237
1	04/08/2015	UNPA	PDE3	494,035
1	04/08/2015	PDE3	RWSN	499,159
1	04/08/2015	RWSN	PATA	328,551
1	04/08/2015	PATA	CHIM	324,899
1	04/08/2015	CHIM	25MA	206,440
1	04/08/2015	25MA	ESQU	647,972
1	04/08/2015	ESQU	CHLT	723,740
2	05/08/2015	AUTF	CHLT	687,109
3	06/08/2015	AUTF	PDE3	804,985
2	05/08/2015	UNPA	CHLT	365,884
2	05/08/2015	PDE3	CHLT	544,648
2	05/08/2015	PDE3	ESQU	684,931
2	05/08/2015	RWSN	ESQU	507,529
2	05/08/2015	RWSN	CHIM	467,327

Na seção 4.3.1 são apresentados os resultados e análise do experimento 3 com base nos cenários 1 e 2.

4.3.1 Resultados e análise.

Na Tabela 77, os vetores linhas de base de 1 a 8 foram obtidas do processamento com dados coletados em 04/08/2015 e de 9 ao 15 na data 05/08/2015.

Tabela 77 - Componentes vetoriais das linhas de base da rede localizada no Brasil.

LB	Base	Rover	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	D _{Iij} (m)	Sigma (m)
1	RSAL	RSCL	131691,079	-16467,971	159686,064	207637,600	0,021
2	RSCL	SCCH	202185,864	84061,355	98383,188	240051,425	0,024
3	SCCH	PRCV	-5653,566	-136731,362	216465,576	256095,244	0,026
4	PRCV	OURI	341068,294	154565,482	203952,177	426397,186	0,043
5	OURI	UFPR	-21968,493	129783,737	-252694,170	284922,404	0,029
6	UFPR	SCFL	-17125,546	127413,021	-212837,288	248650,505	0,025
7	SCFL	POAL	-279106,648	-62677,821	-240275,846	373579,325	0,038
8	POAL	RSPE	-158398,550	661,528	-164336,337	228247,606	0,023
9	RSAL	RSPE	192692,516	280607,843	-191656,731	390644,941	0,039
10	RSCL	RSPE	61001,408	297075,891	-351342,755	464130,357	0,047
11	RSCL	POAL	219399,883	296414,450	-187006,346	413484,229	0,042
12	SCCH	POAL	17214,063	212353,010	-285389,578	356142,297	0,036
13	SCCHJ	SCFL	296320,683	275030,869	-45113,707	406796,230	0,041
14	SCCH	UFPR	313446,223	147617,862	167723,588	384929,565	0,039
15	PRCV	UFPR	319099,795	284349,225	-48741,989	430180,128	0,043

Ressalta-se que a época 2015,594 (05/08/2015) foi adotada como referência nos procedimentos de atualização das coordenadas e dos parâmetros de transformação nas duas redes geodésicas.

O ajustamento livre para análise de qualidade das componentes dos vetores linhas de base foi realizado com base nos dados disponíveis na Tabela 76. Os testes Qui-quadrado e data snooping foram aplicados com base no nível de significância de 5%. Nesse ajustamento há 9 estações e 15 linhas de base independentes e, portanto, um total de 27 parâmetros, 45 observações e 18 graus de liberdade.

A variância à posteriori foi de 0,749, houve aprovação no teste Qui-quadrado e não foram localizadas observações como outliers com base no teste *data snooping* com o nível de significância adotado.

O ajustamento injuncionado com base em parâmetros ponderados foi realizado após a execução do ajustamento livre. As estações de controle empregadas nesse procedimento foram RSAL, SCFL e OURI e suas precisões foram extraídas de seus descritivos. Nesse ajustamento, tem-se 27 parâmetros, 54 observações, 9 parâmetros ponderados e grau de liberdade igual a 18.

A Figura 63 ilustra a rede localizada no Brasil a qual é formada por nove estações e os vetores linhas de base resultantes do processamento das observáveis GPS. As linhas contínuas em azul são provenientes da coleta de dados do dia 04/08/2015 e as linhas tracejadas em vermelho do dia 05/08/2015.

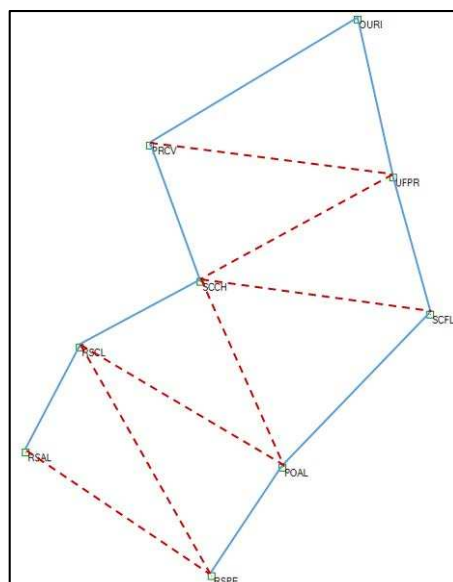


Figura 63 - Rede geodésica no Brasil.

Na Tabela 78 estão disponíveis os resultados dos testes estatísticos do ajustamento injuncionado para a rede localizada no Brasil.

Tabela 78 - Resultados dos testes estatísticos no ajustamento injuncionado

IDMV	v	$\hat{\sigma}_0^2$	Qui-quadrado				Data snooping
			$\chi^2_{v; \frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2_{\text{calc.}}$	$\chi^2_{v; 1 - \frac{\alpha}{2}}$	Resultado	Resultado
1	18	2,64	8,23	47,65	31,53	Não Passou	Passou
2	18	2,61	8,23	46,95	31,53	Não Passou	Passou
3	18	2,64	8,23	47,48	31,53	Não Passou	Passou
4	18	2,64	8,23	47,55	31,53	Não Passou	Passou
5	18	2,61	8,23	47,04	31,53	Não Passou	Passou
6	18	2,69	8,23	48,44	31,53	Não Passou	Passou
7	18	2,43	8,23	43,79	31,53	Não Passou	Passou
8	18	2,63	8,23	47,37	31,53	Não Passou	Passou
9	18	2,62	8,23	47,15	31,53	Não Passou	Passou
10	18	2,62	8,23	47,18	31,53	Não Passou	Passou
11	18	2,66	8,23	47,87	31,53	Não Passou	Passou
12	18	2,61	8,23	47,01	31,53	Não Passou	Passou
13	18	2,61	8,23	46,99	31,53	Não Passou	Passou
14	18	2,64	8,23	47,44	31,53	Não Passou	Passou
15	18	2,65	8,23	47,85	31,53	Não Passou	Passou
16	18	2,68	8,23	48,29	31,53	Não Passou	Passou
17	18	2,68	8,23	48,26	31,53	Não Passou	Passou
18	18	2,66	8,23	47,94	31,53	Não Passou	Passou

19	18	2,66	8,23	47,96	31,53	Não Passou	Passou
20	18	2,94	8,23	52,96	31,53	Não Passou	Passou

Sendo: IDMV é o número do modelo de velocidade selecionado - ¹ITRF2000, ²ITRF2005, ³ITRF2008, ⁴APKIM2005D, ⁵APKIM2008D, ⁶NNR-MORVEL56, ⁷Costa, Santos e Gemael (2003), ⁸Perez, Monico e Chaves (2003), ⁹Souza e Garnés (2014), ¹⁰Souza (2013), ¹¹MV_Carvalho, ¹²Grade_VEMOS2009, ¹³VEMOS 2014, ¹⁴GSRM_2.1, ¹⁵GEODVEL2010 (NNR), ¹⁶SOPAC 2004, ¹⁷REVEL2000, ¹⁸NNR-NUVEL-1A, ¹⁹PB2002 e ²⁰Cenário1.

Na Tabela 79 estão apresentadas as precisões, componentes e comprimento dos vetores linhas de base que compõem a rede localizada na Argentina.

Tabela 79 - Componentes vetoriais das linhas de base da rede localizada na Argentina.

LB	Estação de Controle	Rover	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Dij (m)	Sigmas (m)
1	AUTF	UNPA	46793,996	-287059,296	212551,922	360237,473	0,036
2	UNPA	PDE3	346436,921	-213820,211	279880,119	494034,922	0,050
3	PDE3	RWSN	202823,621	-295997,973	346997,623	499158,864	0,050
4	RWSN	PATA	239058,920	-90647,599	206347,477	328550,507	0,033
5	PATA	CHIM	-193444,928	-221035,484	138859,257	324899,244	0,033
6	CHIM	25MA	-88258,836	-142211,662	120845,850	206440,060	0,021
7	25MA	ESQU	-416099,567	238942,913	-435471,496	647972,214	0,065
8	ESQU	CHLT	-272812,289	452576,353	-494518,133	723740,342	0,072
9	AUTF	CHLT	-135502,173	-559252,957	375492,589	687109,448	0,069
10	AUTF	PDE3	393230,918	-500879,546	492431,956	804984,537	0,081
11	UNPA	CHLT	-182296,169	-272193,653	162940,714	365883,799	0,037
12	PDE3	CHLT	-528733,124	-58373,379	-116939,328	544647,569	0,055
13	PDE3	ESQU	-255920,815	-510949,735	377578,783	684931,262	0,069
14	RWSN	ESQU	-458744,426	-214951,784	30581,130	507529,234	0,051
15	RWSN	CHIM	45613,928	-311683,161	345206,698	467327,174	0,047

A Figura 64 ilustra a rede geodésica formada por nove estações e os vetores linhas de base resultantes do processamento das observáveis GPS. As linhas contínuas em azul foram obtidas da sessão de observação do dia 04/08/2015, em vermelho do dia 05/08/2015 e a linha tracejada em azul do dia 06/08/2015.

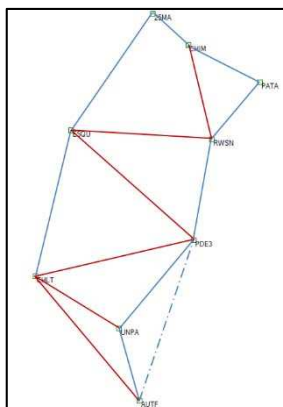


Figura 64 - Rede geodésica na Argentina.

No ajustamento livre das componentes dos vetores linhas de base da rede ilustrada na Figura 64, de mesmo modo que a rede localizada no Brasil, 9 estações e 15 linhas de base independentes e, portanto, um total de 27 parâmetros, 45 observações e 18 graus de liberdade. Não houve aprovação no teste Qui-quadrado, mas não foram localizados *outliers* com base no teste data snooping a 5% de significância. A variância à *posteriori* foi igual a 0,391.

O ajustamento injuncionado da rede ilustrada na Figura 64 foi realizado considerando as coordenadas das estações AUTF, RWSN e 25MA como parâmetros ponderados. Assim, tem-se 27 parâmetros, 54 observações, 9 parâmetros ponderados e grau de liberdade igual a 18. Este ajustamento possibilitou a verificação da influência das coordenadas ponderadas das estações de controle no resultado dos testes estatísticos e nas coordenadas e precisões das estações de interesse.

Na Tabela 80 estão disponíveis os resultados dos testes estatísticos a 5% de significância do ajustamento injuncionado para a rede localizada na Argentina.

Tabela 80 - Resultados dos testes estatísticos no ajustamento injuncionado

IDMV	v	$\hat{\sigma}_0^2$	Qui-quadrado				Data snooping
			$\chi^2_{v; \frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2_{\text{calc.}}$	$\chi^2_{v; 1-\frac{\alpha}{2}}$	Resultado	Resultado
1	18	6,93	8,23	124,76	31,53	Não Passou	(2 outliers)
2	18	6,93	8,23	124,69	31,53	Não Passou	(2 outliers)
3	18	6,89	8,23	124,07	31,53	Não Passou	(2 outliers)
4	18	6,84	8,23	123,14	31,53	Não Passou	(2 outliers)
5	18	6,87	8,23	123,57	31,53	Não Passou	(2 outliers)
6	18	6,78	8,23	122,06	31,53	Não Passou	(2 outliers)
7	18	7,21	8,23	129,81	31,53	Não Passou	(2 outliers)
8	18	6,81	8,23	122,66	31,53	Não Passou	(2 outliers)
9	18	6,96	8,23	125,32	31,53	Não Passou	(2 outliers)
10	18	6,98	8,23	125,69	31,53	Não Passou	(2 outliers)
11	18	6,97	8,23	125,38	31,53	Não Passou	(2 outliers)
12	18	8,06	8,23	145,12	31,53	Não Passou	(2 outliers)
13	18	6,96	8,23	125,23	31,53	Não Passou	(2 outliers)
14	18	6,85	8,23	123,32	31,53	Não Passou	(2 outliers)
15	18	6,92	8,23	124,58	31,53	Não Passou	(2 outliers)
16	18	6,93	8,23	124,81	31,53	Não Passou	(2 outliers)
17	18	6,91	8,23	124,35	31,53	Não Passou	(2 outliers)
18	18	6,85	8,23	123,30	31,53	Não Passou	(2 outliers)
19	18	6,85	8,23	123,29	31,53	Não Passou	(2 outliers)
20	18	6,81	8,23	122,53	31,53	Não Passou	(2 outliers)

A componente Δy do vetor linha de base CHIM-25MA apresentou resíduo padronizado de 2,9 e a coordenada y da estação de controle 25MA valor de 3,17 e, portanto, localizadas como *outliers* pelo teste data snooping a 5% de significância. As mesmas componentes foram detectadas como *outliers* nos dois cenários. Ressalta-se que no ajustamento livre, nenhuma componente foi localizada como outliers, embora não tenha sido aprovado no teste Qui-quadrado a 5% de significância.

As coordenadas das estações das redes geodésicas localizadas no Brasil e na Argentina calculadas no cenário 1, conforme mencionado anteriormente, são consideradas estarem, respectivamente, no SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632).

As coordenadas cartesianas geocêntricas de todas as estações das redes localizadas no Brasil e Argentina no cenário 2 foram transformadas e atualizadas, respectivamente, do IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) e para o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) com base no emprego do programa GEO_TRANSF_REF_ATUALI.

A Tabela 81 apresenta as coordenadas cartesianas das estações de interesse localizadas no Brasil obtidas do ajustamento injuncionado. Ressalta-se que as coordenadas das estações de controle empregadas no ajustamento foram atualizadas da época 2000,4 para a época 2015,594 com uso do modelo de velocidade ITRF2000.

Tabela 81 - Coordenadas e precisões no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).

Estações	Coordenadas			Sigmas		
	X (m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma_{X(m)}$	$\sigma_{Y(m)}$	$\sigma_{Z(m)}$
RSPE	3309120,947	-4299717,166	-3341853,951	0,038	0,038	0,038
POAL	3467519,480	-4300378,684	-3177517,605	0,034	0,035	0,034
UFPR	3763751,672	-4365113,909	-2724404,494	0,028	0,028	0,027
PRCV	3444651,877	-4649463,121	-2675662,498	0,038	0,038	0,038
SCCH	3450305,430	-4512731,728	-2892128,047	0,030	0,030	0,030
RSCL	3248119,558	-4596793,054	-2990511,208	0,027	0,028	0,027

O programa GEO_TRANSF_REF_ATUALI foi empregado para a determinação das velocidades das estações presentes na Tabela 82 com base no modelo de velocidade ITRF2000. E conforme mencionado anteriormente, as velocidades obtidas com os modelos implementados são dadas no mesmos referencial das coordenadas no sistema de referência de origem.

Tabela 82 - Coordenadas e velocidades no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).

Estações	Coordenadas			Velocidades		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx (m/ano)	Vy (m/ano)	Vz (m/ano)
RSPE	3309120,947	-4299717,166	-3341853,951	0,001	-0,007	0,010
POAL	3467519,480	-4300378,684	-3177517,605	0,001	-0,007	0,010
UFPR	3763751,672	-4365113,909	-2724404,494	0,000	-0,006	0,011
PRCV	3444651,877	-4649463,121	-2675662,498	0,000	-0,006	0,011
SCCH	3450305,430	-4512731,728	-2892128,047	0,001	-0,006	0,010
RSCL	3248119,558	-4596793,054	-2990511,208	0,001	-0,006	0,010

A Tabela 83 apresenta as velocidades e coordenadas da Tabela 81 transformadas e atualizadas do IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4).

Tabela 83 - Coordenadas e velocidades no SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4).

Estações	Coordenadas			Velocidades		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx (m/ano)	Vy (m/ano)	Vz (m/ano)
RSPE	3309120,931	-4299717,071	-3341854,117	0,002	-0,007	0,008
POAL	3467519,467	-4300378,591	-3177517,773	0,001	-0,007	0,008
UFPR	3763751,669	-4365113,822	-2724404,670	0,001	-0,007	0,009
PRCV	3444651,878	-4649463,038	-2675662,672	0,001	-0,006	0,009
SCCH	3450305,425	-4512731,641	-2892128,219	0,001	-0,007	0,008
RSCL	3248119,552	-4596792,968	-2990511,378	0,001	-0,007	0,008

Procedimento análogo foi realizado para mudança de referencial e atualização das coordenadas das estações de interesse da rede localizada na Argentina.

A Tabela 84 apresenta as coordenadas cartesianas e precisões das estações de interesse obtidas no ajustamento injuncionado e localizadas na Argentina. Ressalta-se que as coordenadas das estações de controle empregadas no ajustamento foram atualizadas da época 2006,632 para a época 2015,594 com base no modelo de velocidade ITRF2000.

Tabela 84 - Coordenadas e precisões no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).

Estações	Coordenadas			Sigmas		
	X (m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma_{X(m)}$	$\sigma_{Y(m)}$	$\sigma_{Z(m)}$
UNPA	1407712,928	-3707517,250	-4978623,208	0,075	0,075	0,075
PDE3	1754149,860	-3921337,451	-4698743,093	0,079	0,079	0,079
PATA	2196032,435	-4307982,885	-4145397,902	0,066	0,066	0,066
CHIM	2002587,563	-4529018,284	-4006538,624	0,048	0,048	0,048
ESQU	1498229,080	-4432287,128	-4321164,287	0,087	0,087	0,087
CHLT	1225416,758	-3979710,876	-4815682,477	0,086	0,086	0,086

O programa GEO_TRANSF_REF_ATUALI foi empregado para a determinação das velocidades das estações presentes na Tabela 84 com base no modelo de velocidade ITRF2000.

Na Tabela 85 encontram-se as coordenadas e velocidades das estações de interesse estimadas no ajustamento referenciadas ao IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).

Tabela 85 - Coordenadas e velocidades no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594).

Estações	Coordenadas			Velocidades		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx (m/ano)	Vy (m/ano)	Vz (m/ano)
UNPA	1407712,928	-3707517,250	-4978623,208	0,004	-0,007	0,007
PDE3	1754149,860	-3921337,451	-4698743,093	0,003	-0,007	0,007
PATA	2196032,435	-4307982,885	-4145397,902	0,002	-0,007	0,008
CHIM	2002587,563	-4529018,284	-4006538,624	0,002	-0,007	0,009
ESQU	1498229,080	-4432287,128	-4321164,287	0,002	-0,007	0,008
CHLT	1225416,758	-3979710,876	-4815682,477	0,003	-0,007	0,007

A Tabela 86 apresenta as velocidades e coordenadas da Tabela 84 transformadas e atualizadas do IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) para o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632).

Tabela 86 - Coordenadas e velocidades POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632).

Estações	Coordenadas			Velocidades		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx (m/ano)	Vy (m/ano)	Vz (m/ano)
UNPA	1407712,895	-3707517,188	-4978623,277	0,004	-0,007	0,007
PDE3	1754149,832	-3921337,390	-4698743,168	0,004	-0,007	0,007
PATA	2196032,417	-4307982,828	-4145397,986	0,003	-0,007	0,008
CHIM	2002587,547	-4529018,230	-4006538,708	0,002	-0,007	0,009
ESQU	1498229,060	-4432287,074	-4321164,364	0,003	-0,007	0,008
CHLT	1225416,728	-3979710,817	-4815682,546	0,004	-0,007	0,007

A Figura 65 ilustra os *boxplots* para as discrepâncias planimétricas obtidas com base nos procedimentos descritos nos cenários 1 e 2 para determinação posicional no Brasil.

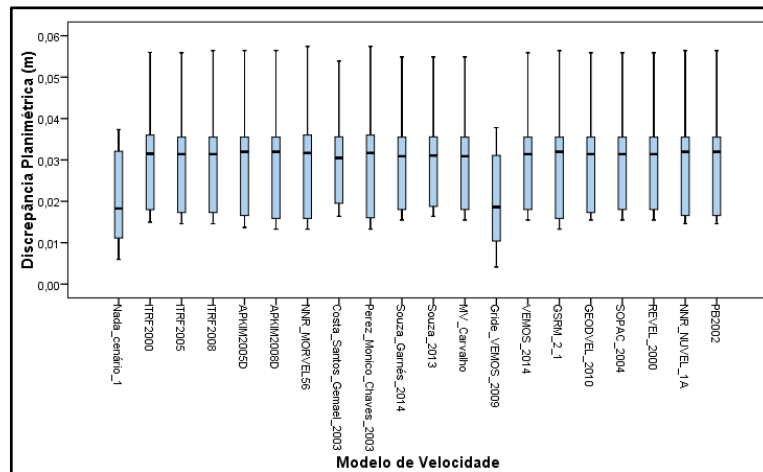


Figura 65 - Boxplots das discrepâncias planimétricas no Brasil.

Na Tabela 87 encontram-se algumas medidas estatísticas para as discrepâncias planimétricas e tridimensionais obtidas das estações de interesse que compõem a rede localizada no Brasil.

Tabela 87 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais (DP).

Modelos de Velocidade	DP	Medidas estatísticas					
		Média	Mediana	AT	RMS	DP	CV%
Nada_Cenário_1	D2D	0,021	0,018	0,031	0,024	0,013	61,39
	D3D	0,067	0,052	0,107	0,079	0,046	69,20
ITRF2000	D2D	0,031	0,031	0,040	0,034	0,015	46,83
	D3D	0,084	0,077	0,102	0,090	0,037	43,71
ITRF2005	D2D	0,031	0,031	0,041	0,034	0,015	48,30
	D3D	0,084	0,077	0,102	0,090	0,036	43,40
ITRF2008	D2D	0,031	0,031	0,042	0,034	0,015	48,75
	D3D	0,084	0,078	0,102	0,090	0,037	43,60
APKIM2005D	D2D	0,031	0,032	0,043	0,034	0,015	49,82
	D3D	0,084	0,078	0,101	0,091	0,036	42,82
APKIM2008D	D2D	0,031	0,032	0,043	0,034	0,016	50,83
	D3D	0,084	0,078	0,102	0,090	0,036	43,19
NNR-MORVEL56	D2D	0,031	0,032	0,044	0,034	0,016	51,65
	D3D	0,084	0,079	0,101	0,090	0,036	42,60
Costa, Santos e Gemael (2003)	D2D	0,031	0,030	0,038	0,033	0,014	43,63
	D3D	0,083	0,073	0,111	0,090	0,040	48,26
Perez, Monico e Chaves (2003)	D2D	0,031	0,032	0,044	0,034	0,016	51,50
	D3D	0,084	0,078	0,103	0,091	0,036	43,33
Souza e Garnés (2014)	D2D	0,031	0,031	0,039	0,034	0,014	46,12
	D3D	0,084	0,077	0,102	0,090	0,037	43,57
Souza (2013)	D2D	0,031	0,031	0,038	0,034	0,014	44,62
	D3D	0,084	0,077	0,102	0,090	0,037	43,78
MV_Carvalho	D2D	0,031	0,031	0,039	0,034	0,014	46,12
	D3D	0,084	0,077	0,102	0,090	0,037	43,80
	D2D	0,020	0,019	0,034	0,024	0,013	67,11

Grade_VEMOS2009	D3D	0,065	0,048	0,116	0,079	0,048	73,34
VEMOS2014	D2D	0,031	0,031	0,040	0,034	0,015	46,83
	D3D	0,084	0,077	0,103	0,090	0,037	44,06
GSRM 2.1 (2014)	D2D	0,031	0,032	0,043	0,034	0,016	50,83
	D3D	0,084	0,078	0,102	0,091	0,036	43,36
GEODVEL2010	D2D	0,031	0,031	0,040	0,034	0,015	47,45
	D3D	0,084	0,077	0,102	0,090	0,036	43,40
SOPAC(2004)	D2D	0,031	0,031	0,040	0,034	0,015	46,83
	D3D	0,084	0,077	0,101	0,090	0,036	43,32
REVEL2000	D2D	0,031	0,031	0,040	0,034	0,015	46,83
	D3D	0,084	0,077	0,101	0,090	0,036	43,37
NNR - NUVEL1A	D2D	0,031	0,032	0,042	0,034	0,015	48,95
	D3D	0,084	0,077	0,101	0,090	0,036	43,15
PB2002	D2D	0,031	0,032	0,042	0,034	0,015	48,95
	D3D	0,084	0,078	0,101	0,090	0,036	43,10

A Figura 66 ilustra os valores dos RMS_{D2D} e RMS_{D3D} obtidas nos posicionamentos realizados no Brasil.

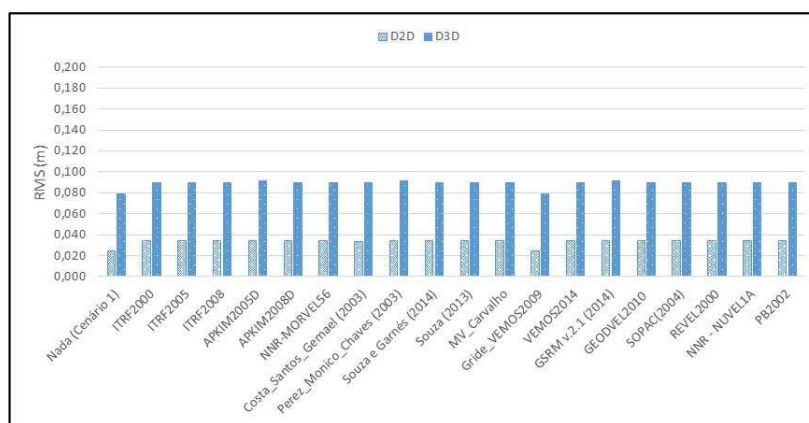


Figura 66 - RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais.

Verifica-se na Figura 66 e os dados da Tabela 87 que os valores do RMS para as D2D para o cenário 1 e o cenário 2 com o emprego da grade do VEMOS2009 foram iguais a 0,024 m. O modelo de Costa, Santos e Gemaél (2003) apresentou valor do RMS DAS D2Dde 0,033 m e os demais modelos valores iguais a 0,034 m.

A Figura 67 ilustra os valores da média da discrepância planimétrica e respectivos coeficientes de variação obtidos nos cenários 1 e 2 com base no emprego de diferentes modelos de velocidade no posicionamento no Brasil.

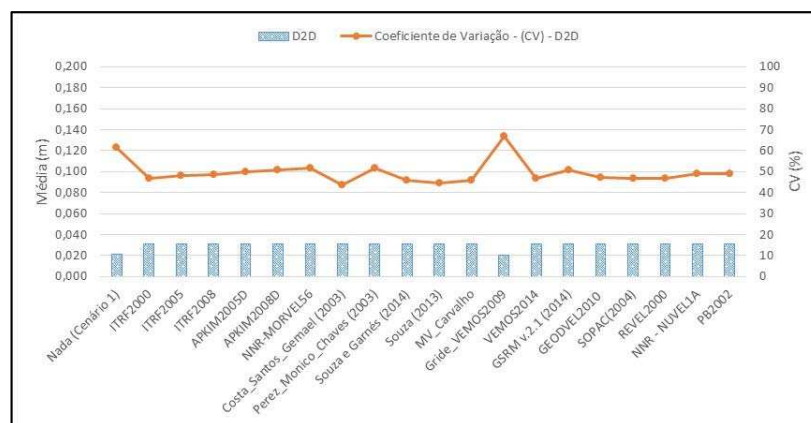


Figura 67 - Média e coeficiente de variação para as D2D.

Com base nos dados presentes na Tabela 87 e na Figura 67 observa-se que o valor médio da D2D para o cenário 1 foi 0,021 m e o menor para essa discrepância no cenário 2 (grade VEMOS2009) foi de 0,020 m. Os coeficientes de variação para a D2D no cenário 1 foi de 61% e para o cenário 2 com uso da grade do VEMOS2009 foi de 67%, ou seja, a variabilidade das discrepâncias obtidas com o emprego da transformação de referencial associada a atualização de coordenadas foi maior 6% em relação ao cenário 1.

Portanto, verifica-se que o uso da metodologia de cálculo da mudança de referencial e atualização de coordenadas no posicionamento em rede, assim como no transporte de coordenadas não proporcionou melhora da qualidade do posicionamento.

A Figura 68 ilustra os boxplots para as discrepâncias planimétricas obtidas com base nos procedimentos descritos nos cenários 1 e 2 para determinação posicional na Argentina.

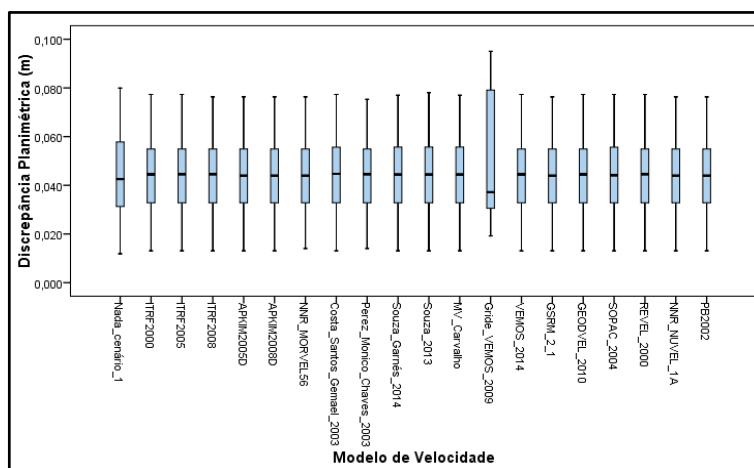


Figura 68 - Boxplots das discrepâncias planimétricas na Argentina.

Na Tabela 88 encontram-se algumas medidas estatísticas para as discrepâncias planimétricas e tridimensionais obtidas das estações de interesse que compõem localizadas na Argentina.

Tabela 88 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais (DP).

Modelos de Velocidade	DP	Medidas estatísticas					
		Média	Mediana	AT	RMS	DP	CV%
Nada (Cenário 1)	D2D	0,044	0,043	0,068	0,049	0,024	54,071
	D3D	0,079	0,052	0,165	0,097	0,062	78,845
ITRF2000	D2D	0,045	0,044	0,064	0,049	0,022	50,302
	D3D	0,080	0,053	0,162	0,098	0,061	76,805
ITRF2005	D2D	0,045	0,045	0,064	0,049	0,022	50,282
	D3D	0,079	0,053	0,161	0,097	0,061	76,945
ITRF2008	D2D	0,044	0,045	0,063	0,049	0,022	49,812
	D3D	0,079	0,053	0,161	0,097	0,061	76,712
APKIM2005D	D2D	0,044	0,044	0,063	0,049	0,022	49,799
	D3D	0,079	0,053	0,160	0,096	0,061	76,977
APKIM2008D	D2D	0,044	0,044	0,063	0,049	0,022	49,799
	D3D	0,079	0,053	0,161	0,097	0,061	77,180
NNR-MORVEL56	D2D	0,044	0,044	0,062	0,049	0,022	49,015
	D3D	0,079	0,053	0,160	0,096	0,061	76,889
Costa, Santos e Gemaél (2003)	D2D	0,045	0,045	0,064	0,049	0,022	50,305
	D3D	0,081	0,053	0,164	0,099	0,063	77,433
Perez, Monico e Chaves (2003)	D2D	0,044	0,045	0,061	0,048	0,021	48,120
	D3D	0,079	0,053	0,158	0,096	0,060	76,447
Souza e Garnés (2014)	D2D	0,045	0,044	0,064	0,049	0,023	50,645
	D3D	0,080	0,054	0,163	0,097	0,062	77,203
Souza (2013)	D2D	0,045	0,044	0,065	0,049	0,023	51,109
	D3D	0,080	0,054	0,163	0,098	0,062	77,123
MV_Carvalho	D2D	0,045	0,044	0,064	0,049	0,023	50,645
	D3D	0,080	0,054	0,163	0,097	0,062	77,203
Grade_VEMOS2009	D2D	0,050	0,037	0,076	0,057	0,030	60,616
	D3D	0,081	0,050	0,172	0,101	0,066	82,326
VEMOS2014	D2D	0,045	0,044	0,064	0,049	0,022	50,302
	D3D	0,080	0,053	0,162	0,097	0,061	77,163
GSRM 2.1 (2014)	D2D	0,044	0,044	0,063	0,049	0,022	49,799
	D3D	0,079	0,053	0,160	0,096	0,061	77,120
GEODVEL2010	D2D	0,045	0,044	0,064	0,049	0,022	50,302
	D3D	0,080	0,053	0,162	0,097	0,061	77,163
SOPAC(2004)	D2D	0,045	0,044	0,064	0,049	0,023	50,771
	D3D	0,080	0,053	0,163	0,098	0,061	77,035
REVEL2000	D2D	0,045	0,045	0,064	0,049	0,022	50,282
	D3D	0,080	0,053	0,162	0,098	0,061	76,773
NNR - NUVEL1A	D2D	0,044	0,044	0,063	0,049	0,022	49,799
	D3D	0,079	0,053	0,161	0,097	0,061	76,595
PB2002	D2D	0,044	0,044	0,063	0,049	0,022	49,799
	D3D	0,079	0,053	0,161	0,097	0,061	76,595

A Figura 69 ilustra o comportamento homogêneo do RMS da D2D obtidos para o cenário 1 e 2, na Argentina. Porém, observa-se que a grade VEMOS2009 proporcionou valor desse RMS ligeiramente superior aos demais.

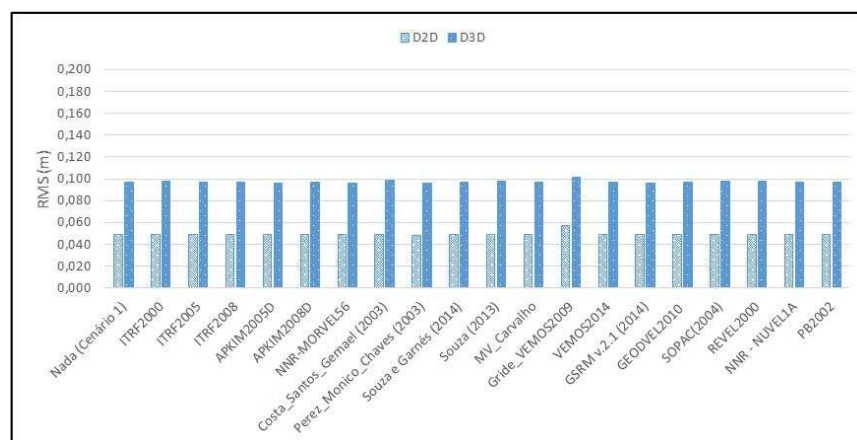


Figura 69 - RMS para discrepâncias planimétricas e tridimensionais.

O modelo de Perez, Monico e Chaves (2003) apresentou valor do RMS da D2D de 0,048 m e os demais modelos 0,049 m. Assim, verifica-se que em termos médios não houve melhora no posicionamento em rede empregando-se a mudança de referencial e atualização de coordenadas

A Figura 70 ilustra os valores da média da discrepância planimétrica e respectivos coeficientes de variação obtidos nos cenários 1 e 2 com base no emprego de diferentes modelos de velocidade para a placa SOAM.

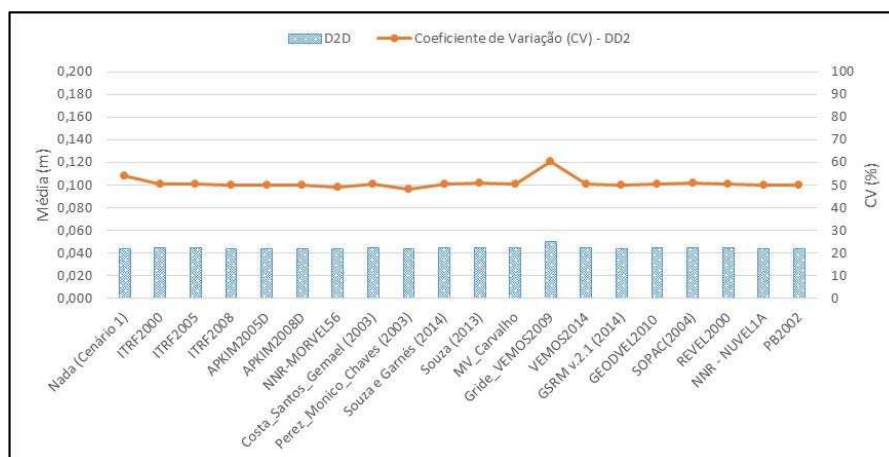


Figura 70 - Média e coeficiente de variação para as D2D.

Em termos de discrepância planimétrica média o menor valor foi de 0,044 m e o maior de 0,050 m. A variabilidade das D2D foram menores que 61%.

O experimento 4 dado na seção 4.4 foi realizado considerando no ajustamento das redes do experimento 3, as coordenadas das estações de controle obtidas da solução

semanal da rede SIRGAS-CON às quais estão referenciadas ao IGB08 (época da semana escolhida).

4.4 Experimento 4

Neste experimento, as linhas de base que ligam as estações das redes são as mesmas do experimento 3. A estação 25MA da rede localizada na Argentina foi considerada no ajustamento como estação de interesse, pois não possui coordenadas na solução semanal da rede SIRGAS-CON. Portanto, no ajustamento injuncionado dos vetores linhas de base dessa rede foram consideradas duas estações de controle. Não houve modificação na rede localizada no Brasil.

O diferencial deste experimento em relação ao experimento 3 reside no fato de que as coordenadas das estações de controle foram obtidas da solução semanal da rede SIRGAS-CON para 05/08/2015 (DOY 217), dispensando, portanto, os procedimentos iniciais de transformação e atualização das coordenadas das estações de controle presentes nos descritivos dessas estações. As coordenadas no IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) obtidas da solução semanal³² das estações escolhidas rede SIRGAS-CON foram inseridas no ajustamento injuncionado. Salienta-se que encontra-se no site do SIRGAS (SIRGAS, 2015) a recomendação do uso dessas coordenadas. Estimadas as coordenadas das estações de interesse nesse referencial e época, a transformação e atualização das coordenadas para o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) e SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) foram realizadas.

Neste experimento, o cenário 1 foi subdividido em a e b. O cenário 1-a corresponde ao cenário 1 dos experimentos 2 e 3 e o cenário 1-b é a comparação direta das coordenadas das estações de interesse estimadas em relação às coordenadas presentes em seus descritivos tanto o Brasil quanto na Argentina.

Ressalta-se que não são fornecidas as precisões das coordenadas semanais da rede SIRGAS-CON e por isso, foram empregadas no ajustamento injuncionado as precisões das coordenadas presentes nos descritivos das estações.

³² <http://www.sirgas.org/index.php?id=153>

4.4.1 Resultados e análise.

A Figura 71 ilustra os boxplots das discrepâncias planimétricas obtidas no posicionamento realizado no Brasil.

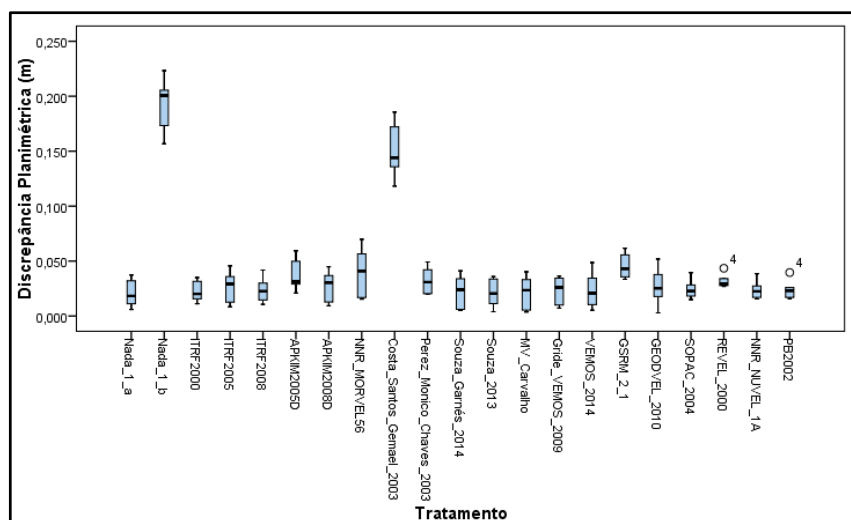


Figura 71 - Boxplots das discrepâncias planimétricas.

Na Figura 71 observa-se que os maiores valores de medianas para as D2D foram obtidos no cenário 1-b e no cenário 2 com o emprego do modelos Costa, Santos e Gemael (2003). O emprego dos modelos REVEL2000 e PB2002 apresentem os menores valores de desvio interquartilico, mas apresentaram discrepâncias planimétricas compreendidas entre 1,5 a 3 vezes o desvio interquartilico.

A Tabela 89 apresenta algumas medidas estatísticas para as discrepâncias planimétricas e tridimensionais calculadas com base nos dados das estações (RSPE, POAL, UFPR, PRCV, SCCH, RSCL) localizadas no Brasil.

Tabela 89 - Medidas estatísticas para D2D e D3D.

Tratamento	DP	Medidas estatísticas					
		Média	Mediana	AT	RMS	DP	CV%
Nada (Cenário 1 - a)	D2D	0,021	0,018	0,031	0,024	0,013	61,391
	D3D	0,067	0,052	0,107	0,079	0,046	69,199
Nada (Cenário 1 - b)	D2D	0,193	0,201	0,067	0,195	0,024	12,515
	D3D	0,213	0,212	0,043	0,213	0,014	6,697
ITRF2000	D2D	0,022	0,020	0,024	0,024	0,010	42,995
	D3D	0,075	0,060	0,108	0,084	0,041	55,235
ITRF2005	D2D	0,027	0,029	0,037	0,030	0,014	52,529
	D3D	0,076	0,064	0,114	0,085	0,042	55,899
ITRF2008	D2D	0,024	0,023	0,031	0,026	0,012	51,064
	D3D	0,078	0,069	0,108	0,086	0,039	50,238
	D2D	0,037	0,031	0,038	0,039	0,015	39,280

APKIM2005D	D3D	0,083	0,078	0,099	0,089	0,036	43,849
APKIM2008D	D2D	0,027	0,030	0,036	0,030	0,014	50,323
	D3D	0,076	0,064	0,114	0,085	0,042	55,376
NNR-MORVEL56	D2D	0,040	0,041	0,054	0,045	0,021	53,717
	D3D	0,087	0,084	0,087	0,092	0,032	36,862
Costa, Santos e Gemael (2003)	D2D	0,150	0,144	0,067	0,152	0,025	16,523
	D3D	0,168	0,149	0,097	0,171	0,039	23,113
Perez, Monico e Chaves (2003)	D2D	0,032	0,031	0,030	0,034	0,013	38,829
	D3D	0,079	0,072	0,108	0,087	0,039	49,761
Souza e Garnés (2014)	D2D	0,022	0,024	0,036	0,026	0,015	65,107
	D3D	0,074	0,062	0,113	0,084	0,042	56,921
Souza (2013)	D2D	0,021	0,021	0,032	0,024	0,012	59,482
	D3D	0,074	0,062	0,111	0,083	0,042	56,365
MV_Carvalho	D2D	0,022	0,024	0,036	0,025	0,015	67,946
	D3D	0,074	0,062	0,113	0,084	0,042	57,100
Grade_VEMOS2009	D2D	0,023	0,026	0,029	0,026	0,012	52,348
	D3D	0,074	0,062	0,111	0,083	0,042	56,173
VEMOS2014	D2D	0,023	0,021	0,043	0,028	0,016	68,995
	D3D	0,074	0,059	0,116	0,084	0,044	58,850
GSRM 2.1 (2014)	D2D	0,045	0,043	0,028	0,047	0,012	26,191
	D3D	0,086	0,081	0,101	0,092	0,037	42,688
GEODVEL2010	D2D	0,027	0,025	0,049	0,031	0,017	62,946
	D3D	0,082	0,075	0,100	0,088	0,036	44,075
SOPAC(2004)	D2D	0,024	0,023	0,024	0,026	0,009	35,478
	D3D	0,076	0,064	0,104	0,084	0,039	51,808
REVEL2000	D2D	0,032	0,029	0,016	0,032	0,006	19,727
	D3D	0,079	0,066	0,096	0,086	0,037	46,720
NNR - NUVEL1A	D2D	0,024	0,023	0,023	0,025	0,008	35,236
	D3D	0,076	0,064	0,104	0,084	0,039	51,918
PB2002	D2D	0,024	0,023	0,024	0,025	0,009	35,442
	D3D	0,076	0,064	0,103	0,084	0,039	51,495

A Figura 72 ilustra os RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais obtidas no posicionamento realizado no Brasil.

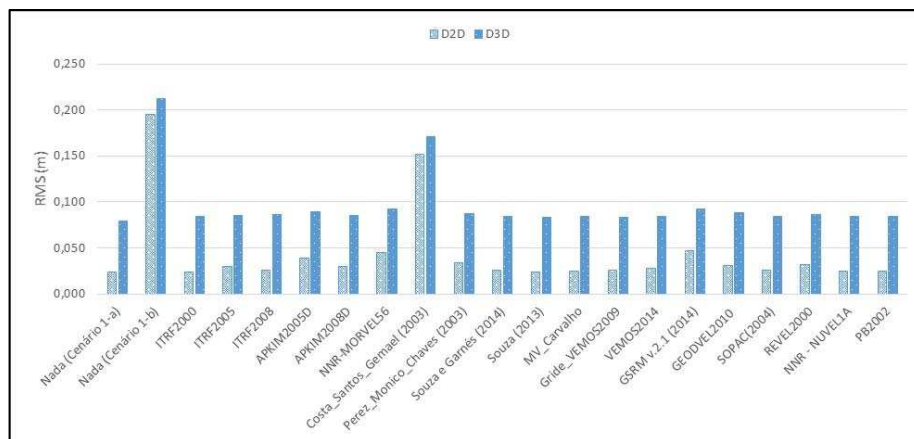


Figura 72 - RMS para as D2D e D3D.

Na Figura 72 observa-se que no cenário 1–b onde não foram aplicados os procedimentos de transformação e atualização foi obtido o maior valor para os RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais. Portanto, ao se empregar as coordenadas da solução semanal da rede SIRGAS-CON das estações de controle é necessário empregar a mudança de referencial e época oficiais no Brasil.

Comparando o cenário 1–a onde as coordenadas das estações de controle empregadas no ajustamento injuncionado estão em SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) com as obtidas no cenário 2 não foi observado melhora na qualidade do posicionamento.

A Tabela 90 apresenta os valores do RMS das D2D obtidos com base nas estações no Brasil ordenados do menor para o maior valor bem como as diferenças entre cada modelo empregado em relação ao modelo da primeira posição.

Tabela 90 - RMS da D2D ordenados do menor para o maior valor.

Posição	Tratamentos	RMS – D2D (m)	Δ RMS – D2D (m)
1	Nada (Cenário 1-a)	0,024	-
2	ITRF2000	0,024	0,000
3	Souza (2013)	0,024	0,000
4	MV_Carvalho	0,025	0,001
5	NNR - NUVEL1A	0,025	0,001
6	PB2002	0,025	0,001
7	ITRF2008	0,026	0,002
8	Souza e Garnés (2014)	0,026	0,002
9	Grade_VEMOS2009	0,026	0,002
10	SOPAC(2004)	0,026	0,002
11	VEMOS2014	0,028	0,004
12	ITRF2005	0,030	0,006
13	APKIM2008D	0,030	0,006
14	GEODVEL2010	0,031	0,007
15	REVEL2000	0,032	0,008
16	Perez, Monico e Chaves (2003)	0,034	0,010
17	APKIM2005D	0,039	0,015
18	NNR-MORVEL56	0,045	0,021
19	GSRM v.2.1 (2014)	0,047	0,023
20	Costa, Santos e Gemaél (2003)	0,152	0,128
21	Nada (Cenário 1-b)	0,195	0,171

Da Tabela 90 percebe-se que o cenário 1–a e o cenário 2 com emprego dos modelos ITRF2000 e Souza (2013) apresentaram o mesmo valor (0,024 m) para o RMS das D2D. Diferindo desses em 0,001 m estão os modelos MV_Carvalho, NNR-NUVEL1A, PB2002 e ITRF2008. Percebe-se também que dependendo da escolha do

modelo de velocidade há uma piora na qualidade do posicionamento com aplicação dos procedimentos do cenário 2.

A Figura 73 ilustra os valores médios das D2D e respectivos coeficientes de variação.

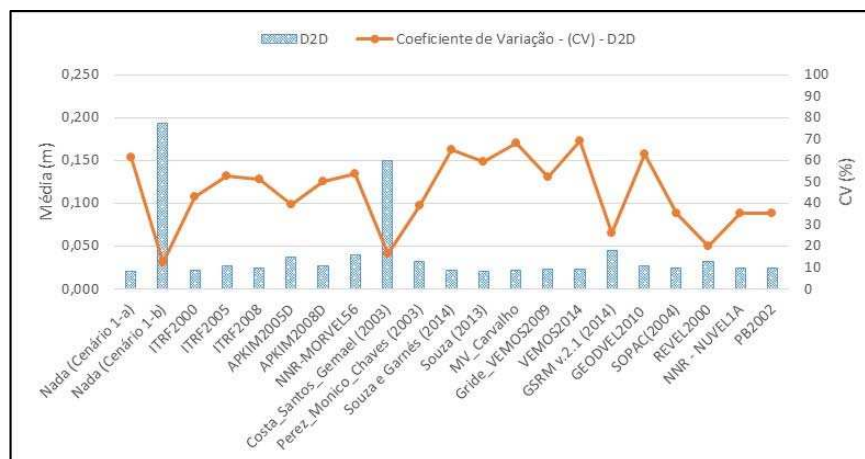


Figura 73 - Média e coeficiente de variação para as D2D.

A Tabela 91 apresenta de as medidas das D2D obtidas para o posicionamento em rede realizado no Brasil.

Tabela 91 - Média da D2D ordenadas do menor para o maior valor.

Posição	Tratamentos	MÉDIA – D2D (m)	Δ MÉDIA – D2D (m)
1	Nada (Cenário 1-a)	0,021	
2	Souza (2013)	0,021	0,000
3	ITRF2000	0,022	0,001
4	Souza e Garnés (2014)	0,022	0,001
5	MV_Carvalho	0,022	0,001
6	Grade_VEMOS2009	0,023	0,002
7	VEMOS2014	0,023	0,002
8	ITRF2008	0,024	0,003
9	SOPAC(2004)	0,024	0,003
10	NNR - NUVEL1A	0,024	0,003
11	PB2002	0,024	0,003
12	ITRF2005	0,027	0,006
13	APKIM2008D	0,027	0,006
14	GEODVEL2010	0,027	0,006
15	Perez, Monico e Chaves (2003)	0,032	0,011
16	REVEL2000	0,032	0,011
17	APKIM2005D	0,037	0,016
18	NNR-MORVEL56	0,040	0,019
19	GSRM v.2.1 (2014)	0,045	0,024
20	Costa, Santos e Gemael (2003)	0,150	0,129
21	Nada (Cenário 1-b)	0,193	0,172

De acordo com o experimento 4, foi verificado a necessidade da mudança de referencial e atualização das coordenadas quando emprega-se as coordenadas da solução semanal da rede SIRGAS-CON para posicionamentos realizados no Brasil. Observa-se também que a escolha do modelo de velocidade tem influência na qualidade do posicionamento. Portanto, não foi detectado melhora na determinação da posição com inserção dos procedimentos de mudança de referencial e atualização no cenário 2 em relação ao cenário 1-a.

No Ajustamento da rede localizada na Argentina (Fig. 64), conforme já mencionado, devido a inexistência das coordenadas da estação 25MA na solução semanal da rede SIRGAS-CON a mesma foi desconsiderada no ajustamento. Desse modo, a nova rede contará com duas estações de controle (AUTF, RWSN).

Para fins de comparação foi realizado inicialmente o ajustamento injuncionado considerando as coordenadas das estações de controle (AUTF, RWSN) presentes em seus descritivos. Esse ajustamento passou no teste qui-quadrado a 5% de significância e não foram localizados outliers.

O ajustamento injuncionado também foi realizado considerando as coordenadas das estações de controle obtidas da solução semanal (05/08/2015) da rede SIRGAS-CON. Foi aprovado no teste qui-quadrado a 5% de significância e não foram localizados outliers considerando nível de rejeição de 2,8.

A Figura 74 ilustra os boxplots simultâneos das D2D por tratamento dado na determinação posicional na Argentina.

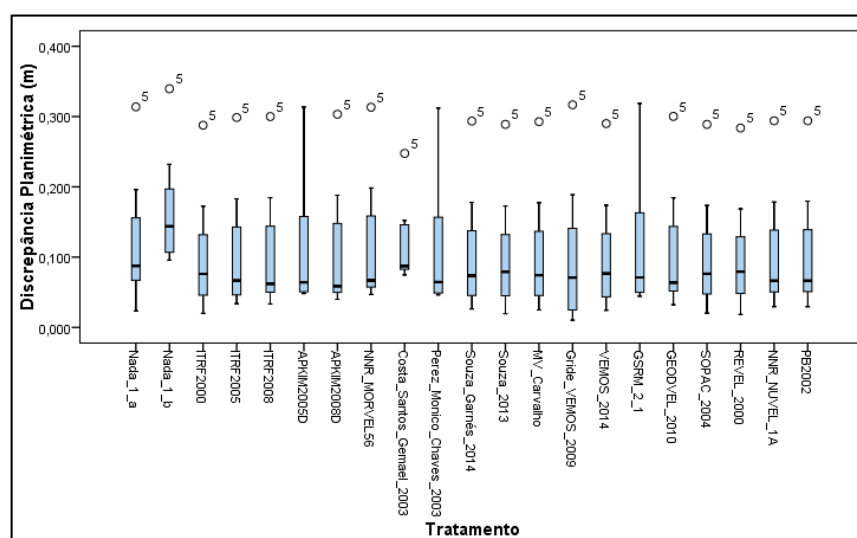


Figura 74 - Boxplots das D2D em função do tratamento.

Na Figura 74 observa-se que com exceção ao emprego dos modelos APKIM2005D; Perez, Monico e Chaves (2003) e GSRM v.2.1, os demais apresentaram valores de D2D como outliers.

A Tabela 92 apresenta algumas medidas estatísticas para as discrepâncias planimétricas e tridimensionais calculadas com base nos dados das estações (UNPA, PDE3, PATA, CHIM, 25MA, ESQU, CHLT) localizadas na Argentina.

Tabela 92 - Medidas estatísticas para D2D e D3D.

Modelos de Velocidade	DP	Medidas estatísticas					
		Média	Mediana	AT	RMS	DP	CV%
Nada (Cenário 1 - a)	D2D	0,124	0,088	0,291	0,155	0,099	79,889
	D3D	0,171	0,147	0,306	0,197	0,106	62,027
Nada (Cenário 1 - b)	D2D	0,170	0,144	0,244	0,188	0,088	52,125
	D3D	0,216	0,177	0,300	0,234	0,098	45,629
ITRF2000	D2D	0,106	0,076	0,268	0,137	0,094	89,193
	D3D	0,173	0,152	0,338	0,202	0,112	64,315
ITRF2005	D2D	0,111	0,067	0,265	0,143	0,097	87,659
	D3D	0,177	0,156	0,337	0,206	0,113	63,600
ITRF2008	D2D	0,112	0,062	0,267	0,144	0,097	87,037
	D3D	0,177	0,154	0,339	0,205	0,113	63,717
APKIM2005D	D2D	0,120	0,064	0,265	0,153	0,101	84,056
	D3D	0,185	0,160	0,337	0,213	0,113	60,924
APKIM2008D	D2D	0,114	0,059	0,263	0,146	0,099	86,538
	D3D	0,180	0,158	0,336	0,208	0,113	62,671
NNR-MORVEL56	D2D	0,123	0,067	0,266	0,154	0,100	81,160
	D3D	0,187	0,161	0,335	0,213	0,111	59,407
Costa, Santos e Gemael (2003)	D2D	0,124	0,087	0,173	0,137	0,063	50,530
	D3D	0,182	0,171	0,256	0,202	0,093	50,950
Perez, Monico e Chaves (2003)	D2D	0,119	0,065	0,266	0,152	0,101	84,931
	D3D	0,185	0,161	0,336	0,212	0,113	61,113
Souza e Garnés (2014)	D2D	0,109	0,074	0,267	0,140	0,096	88,349
	D3D	0,175	0,154	0,339	0,204	0,113	64,219
Souza (2013)	D2D	0,106	0,079	0,269	0,138	0,095	89,364
	D3D	0,173	0,152	0,340	0,202	0,112	64,676
MV_Carvalho (2015)	D2D	0,108	0,074	0,268	0,140	0,096	88,567
	D3D	0,175	0,154	0,339	0,204	0,113	64,323
Grade_VEMOS2009	D2D	0,104	0,071	0,306	0,147	0,112	107,295
	D3D	0,176	0,148	0,365	0,209	0,121	69,073
VEMOS2014	D2D	0,1065	0,0769	0,2657	0,1380	0,0948	89,0373
	D3D	0,1738	0,1533	0,3374	0,2025	0,1122	64,5699
GSRM 2.1 (2014)	D2D	0,123	0,071	0,274	0,156	0,104	84,336
	D3D	0,187	0,163	0,336	0,215	0,114	60,737
GEODVEL2010	D2D	0,112	0,064	0,268	0,144	0,097	86,522
	D3D	0,174	0,149	0,340	0,203	0,113	64,594

SOPAC(2004)	D2D	0,107	0,076	0,269	0,138	0,094	88,503
	D3D	0,174	0,152	0,339	0,202	0,111	64,028
REVEL2000	D2D	0,105	0,079	0,265	0,136	0,092	87,965
	D3D	0,173	0,151	0,336	0,201	0,110	63,522
NNR - NUVEL1A	D2D	0,110	0,066	0,265	0,141	0,095	86,642
	D3D	0,177	0,154	0,337	0,204	0,111	62,943
PB2002	D2D	0,110	0,066	0,265	0,141	0,095	86,471
	D3D	0,177	0,154	0,337	0,204	0,111	62,919

A Figura 75 ilustra os RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais calculados com base nas discrepâncias obtidas no posicionamento na Argentina.

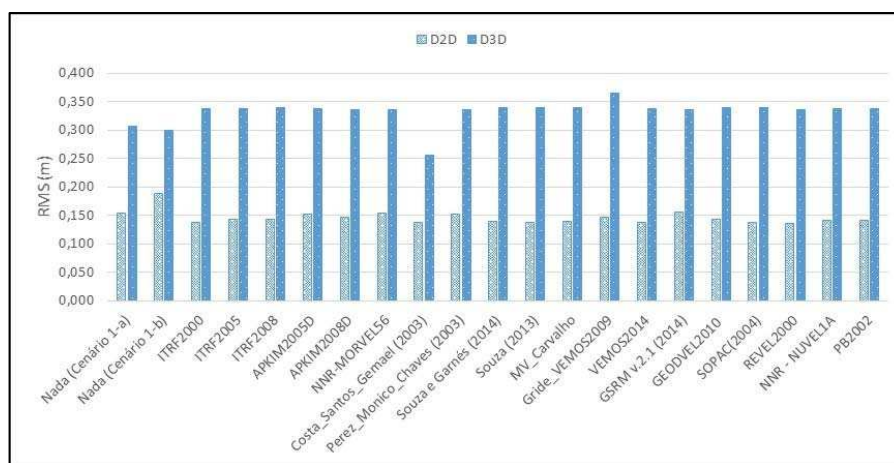


Figura 75 - RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais.

Na Figura 75 observa-se que no cenário 1 - b onde não foram aplicados os procedimentos de transformação e atualização foi obtido o maior valor de RMS_{D2D} em relação ao cenário 1-a e cenário 2. Portanto, ao se empregar as coordenadas da solução semanal da rede SIRGAS-CON das estações de controle é necessário empregar a mudança de referencial e época oficiais na Argentina.

A Tabela 93 apresenta os valores do RMS_{D2D} obtidos com base nas estações na Argentina ordenados do menor para o maior valor bem como as diferenças entre cada modelo empregado em relação ao modelo da primeira posição.

Tabela 93 - RMS_{D2D} ordenados do menor para o maior valor.

Posição	Tratamentos	RMS_{D2D} (m)	ΔRMS_{D2D} (m)
1	REVEL2000	0,136	-
2	ITRF2000	0,137	0,001
3	Costa, Santos e Gemael (2003)	0,137	0,001
4	Souza (2013)	0,138	0,002
5	VEMOS2014	0,138	0,002
6	SOPAC(2004)	0,138	0,002
7	Souza e Garnés (2014)	0,140	0,004
8	MV_Carvalho (2015)	0,140	0,004

9	NNR - NUVEL1A	0,141	0,005
10	PB2002	0,141	0,005
11	ITRF2005	0,143	0,007
12	ITRF2008	0,144	0,008
13	GEODVEL2010	0,144	0,008
14	APKIM2008D	0,146	0,010
15	Grade_VEMOS2009	0,147	0,011
16	Perez, Monico e Chaves (2003)	0,152	0,016
17	APKIM2005D	0,153	0,017
18	NNR-MORVEL56	0,154	0,018
19	Nada (Cenário 1-a)	0,155	0,019
20	GSRM v.2.1 (2014)	0,156	0,020
21	Nada (Cenário 1-b)	0,188	0,052

Diferentemente do que ocorreu no experimento 3 e no Brasil neste experimento, a desconsideração da atualização das coordenadas e mudança de referencial afetou a qualidade do posicionamento. Esse fato pode ser visualizado na Tabela 93. A exceção foi o emprego do modelo GSRM V.2.1 (2014) que apresentou valor para o RMS_{D2D} entre os cenários 1 a e b. Em termos de modelo de velocidade, o melhor opção foi o emprego do modelo REVEL2000 e o pior o modelo GSRM V.2.1 cuja diferença de RMS_{D2D} foi de 0,020 m. Os 14 primeiros modelos apresentaram compatibilidade milimétrica em termos do RMS_{D2D} . Ao contrário do que ocorreu no Brasil, o modelo Costa, Santos e Gemael (2003) apresentou boa performance na atualização das coordenadas na Argentina.

A Figura 76 ilustra os valores médios das D2D e respectivos coeficientes de variação.

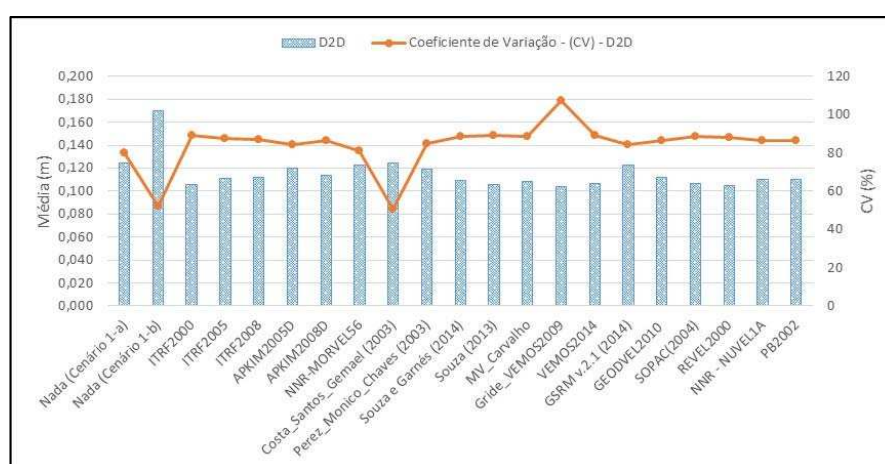


Figura 76 - Média e coeficiente de variação para as D2D.

A Tabela 94 apresenta as medidas das D2D obtidas para o posicionamento em rede realizado na Argentina.

Tabela 94 - Média da D2D ordenadas do menor para o maior valor.

Posição	Tratamentos	Média – D2D (m)	Δ Média – D2D (m)
1	Grade_VEMOS2009	0,104	
2	REVEL2000	0,105	0,001
3	ITRF2000	0,106	0,002
4	Souza (2013)	0,106	0,002
5	VEMOS2014	0,107	0,003
6	SOPAC(2004)	0,107	0,003
7	MV_Carvalho (2015)	0,108	0,004
8	Souza e Garnés (2014)	0,109	0,005
9	NNR - NUVEL1A	0,110	0,006
10	PB2002	0,110	0,006
11	ITRF2005	0,111	0,007
12	ITRF2008	0,112	0,008
13	GEODVEL2010	0,112	0,008
14	APKIM2008D	0,114	0,010
15	Perez, Monico e Chaves (2003)	0,119	0,015
16	APKIM2005D	0,120	0,016
17	NNR-MORVEL56	0,123	0,019
18	GSRM v.2.1 (2014)	0,123	0,019
19	Nada (Cenário 1-a)	0,124	0,020
20	Costa, Santos e Gemaél (2003)	0,124	0,020
21	Nada (Cenário 1-b)	0,170	0,066

Observa-se na Tabela 94 que a diferença da discrepância média entre o melhor e pior modelo é da ordem de 2 cm.

No experimento 5 é empregado o AUSPOS para determinação das coordenadas das estações de interesse das redes empregadas nos experimentos 3 e 4.

4.5 Experimento 5

Neste experimento foi utilizado o serviço online de processamento de dados GPS (AUSPOS) que realiza o processamento do posicionamento relativo estático, em rede, com base no software Bernese GNSS v. 5.2 para determinação das coordenadas cartesianas e precisões (2 sigmas) referenciadas ao IGB08 (ITRF2008, época média da coleta dos dados). O AUSPOS pode ser acessado pelo endereço³³ (GEOSCIENCE AUSTRALIA, 2015). Informações sobre o emprego do AUSPOS para posicionamento geodésico no Brasil podem ser obtidas em Carvalho e Dal Poz (2014), Carvalho et al. (2015) e em *Geoscience Australia* (2015).

³³ <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>

As observáveis GPS coletadas no dia 05/08/2015 nas estações das duas redes descritas no experimento 3 foram empregadas para o processamento no AUSPOS. As coordenadas obtidas no processamento foram transformadas e atualizadas com base nos parâmetros do IERS e 19 modelos de velocidades do IGB08 (ITRF2008, época 2015,594) para os referenciais POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632) e SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4). Esse é um tipo de aplicação onde o usuário não tem como entrar com as coordenadas das estações de controle de acordo com o referencial oficial no país na realização dos processamento e ajustamento.

Com intuito de mostrar impacto na posição devido a desconsideração da compatibilização de referencial e época, as coordenadas obtidas com o emprego do AUSPOS foram comparadas com as disponíveis nos descritivos dessas estações empregadas no experimento 3. Portanto, desconsidera-se os deslocamentos no tempo das estações para períodos de 8,962 anos e 15,194 anos, respectivamente, na Argentina e no Brasil bem como a diferença existente entre os referenciais envolvidos. Essa comparação neste experimento foi denominado de Nada (cenário 1). Nada (cenário 1), refere-se a ausência de atualização e mudança de referencial das coordenadas.

A Figuras 77 ilustra a tela de *upload* dos dados GPS, informações da altura e modelo da antena empregados na coleta dos dados bem como o endereço de e-mail do usuário para envio dos resultados dos processamentos.

The screenshot shows the AUSPOS web interface. On the left is a navigation menu with categories like 'Geodesy and Global Navigation Systems' and 'AUSPOS - Online GPS Processing Service'. The main content area is titled 'AUSPOS' and shows a form for uploading RINEX files. The form includes a table with columns for File Name, Height (m), and Antenna Type. There are 9 rows of data, each with a file name starting with 'chim2170.15o', a height of 0.0000, and an antenna type of 'LEIAR10 NONE'. Below the table is a field for 'Your Email Address' with the value 'ascufpr@gmail.com'. At the bottom are 'submit' and 'start over' buttons.

File Name	Height (m)	Antenna Type
chim2170.15o	0.0000	LEIAR10 NONE
25ma2170.15o	0.0000	TRM57971.00 TZGD
autf2170.15o	0.0000	ASH700936D_M SNOW
chlt2170.15o	0.0000	TRM41249.00 NONE
esqu2170.15o	0.0000	TRM41249.00 NONE
pata2170.15o	0.0000	LEIAR10 NONE
pde32170.15o	0.0000	LEIAS10 NONE
rwan2170.15o	0.058	LEIAR10 NONE
unpa2170.15o	0.0000	LEIAS10 NONE

Figura 77 - Tela principal do serviço AUSPOS.

Fonte: Geoscience Austrália (2015).

A Figura 78 ilustra a distribuição espacial das estações de controle (triângulos) e de interesse (círculos) empregadas no posicionamento relativo com solução em rede na Argentina (à direita) e no Brasil (à esquerda).

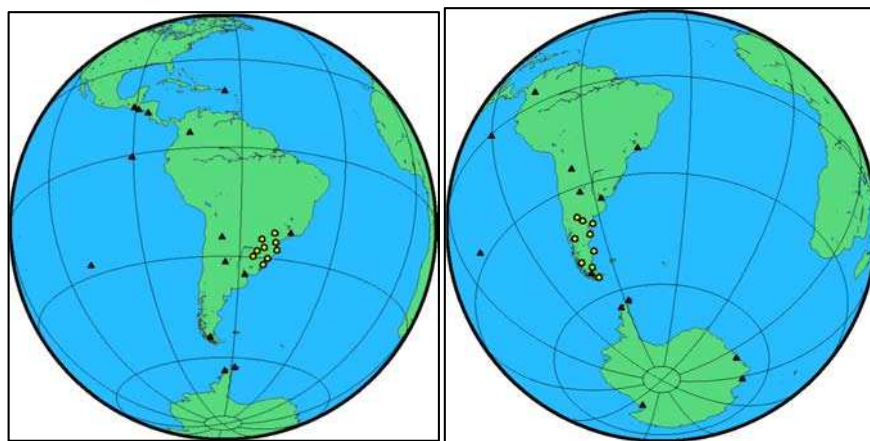


Figura 78 - Estações da rede IGS, APREF, RAMSAC e RBMC.
Fonte: relatório de processamento do AUSPOS.

Na seção 4.5.1 apresentam-se resultados deste experimento e as análises das implicações do emprego de diferentes modelos de movimento para a placa SOAM na atualização das coordenadas bem como da compatibilização de referencial.

4.5.1 Resultados e análise.

Salienta-se que o AUSPOS não permite interferência do usuário na escolha de estratégias a serem adotadas na determinação posicional. No posicionamento na Argentina, o AUSPOS empregou 14 estações de controle (13 da rede IGS e 1 do projeto APREF - Ásia-Pacific Reference Frame) para o posicionamento das nove (9) estações das redes localizadas no Brasil e na Argentina conforme pode-se visualizar na Figura 78. As estações de controle no experimento 3 na Argentina (AUTF, RWSN, 25MA) e no Brasil (RSAL, SCFL, OURI) não foram consideradas nos cálculos das discrepâncias, mas consideradas no processamento com uso do AUSPOS.

Na Argentina foram geradas no processamento 22 linhas de base das quais, quatro (4) interligam as estações de interesse, com resolução da ambiguidade e comprimento médio, respectivamente, de 76,4% e 1.351, 668 km. No Brasil, também foram geradas 22 linhas de base das quais, oito (8) interligam as estações de interesse, com resolução da ambiguidade e comprimento médio, respectivamente, de 82,2% e 1.302,637 km. Nota-se que em relação ao processamento dos dados na Argentina que houve acréscimo de 5,8% na média da resolução da ambiguidade. Salienta-se que em ambos os processamentos realizados pelo AUSPOS foram empregadas efemérides precisas IGS e coordenadas das estações de controle no IGB08 (ITRF2008, época da coleta dos dados).

A Figura 79 ilustra os boxplots das discrepâncias planimétricas D2D na determinação posicional na Argentina.

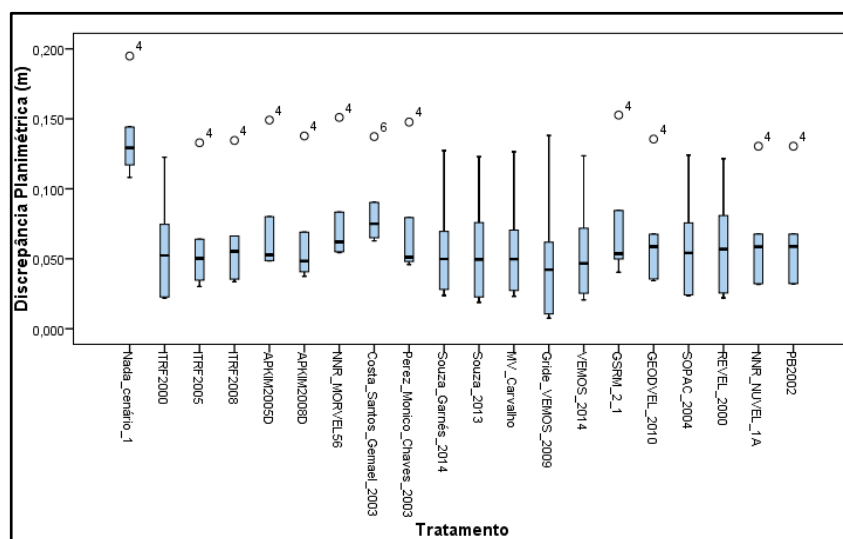


Figura 79 - Boxplots discrepâncias planimétricas na Argentina.

Na Figura 79 observa-se outlier para o cenário 1 e modelos ITRF2005, ITRF2008, APKIM2005D, APKIM2008D, NNR-MORVEL56, Perez, Monico e Chaves (2003) GSRM v.2.1, GEODVEL2010, NNR-NUVEL1A e PB2002. No emprego do modelo Costa, Santos e Gemael (2003) foi localizada como outlier uma D2D. O emprego dos modelos Souza e Garnés (2014), Souza (2013), MV_Carvalho, grade VEMOS2009 e o VEMOS2014 não apresentaram outliers.

Na Tabela 95 encontram-se algumas medidas estatísticas das discrepâncias planimétricas e tridimensionais para o processamento e ajustamento realizado pelo AUSPOS. As discrepâncias foram calculadas comparando as coordenadas transformadas e atualizadas do IGB08 (ITRF2008, época 2015,954) para o POSGAR07 (ITRF2005, época 2006,632).

Tabela 95 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais (DP).

Tratamento	DP	Medidas estatísticas					
		Média (m)	Mediana (m)	AT (m)	RMS (m)	DP (m)	CV (%)
Nada (cenário 1)	D2D	0,137	0,129	0,087	0,140	0,032	23,121
	D3D	0,154	0,144	0,103	0,158	0,042	27,175
ITRF2000	D2D	0,058	0,052	0,101	0,067	0,038	65,069
	D3D	0,081	0,058	0,179	0,103	0,070	85,808
ITRF2005	D2D	0,060	0,050	0,103	0,070	0,038	63,253
	D3D	0,086	0,058	0,167	0,105	0,066	77,531
ITRF2008	D2D	0,063	0,055	0,101	0,072	0,037	58,782
	D3D	0,087	0,062	0,161	0,105	0,064	73,438
	D2D	0,072	0,053	0,101	0,081	0,040	55,093

APKIM2005D	D3D	0,098	0,073	0,145	0,112	0,060	61,155
APKIM2008D	D2D	0,064	0,048	0,100	0,073	0,038	59,951
	D3D	0,089	0,062	0,157	0,107	0,064	71,223
NNR-MORVEL56	D2D	0,078	0,062	0,097	0,085	0,038	48,127
	D3D	0,103	0,080	0,141	0,116	0,058	55,941
Costa, Santos e Gemaël (2003)	D2D	0,084	0,075	0,075	0,088	0,028	33,031
	D3D	0,102	0,076	0,170	0,118	0,065	63,752
Perez, Monico e Chaves (2003)	D2D	0,071	0,051	0,102	0,079	0,040	56,399
	D3D	0,097	0,071	0,145	0,111	0,060	61,784
Souza e Garnés (2014)	D2D	0,058	0,050	0,104	0,068	0,038	65,784
	D3D	0,082	0,056	0,175	0,103	0,069	83,487
Souza (2013)	D2D	0,057	0,050	0,104	0,067	0,039	68,419
	D3D	0,080	0,055	0,182	0,103	0,071	88,303
MV_Carvalho	D2D	0,058	0,050	0,103	0,067	0,038	65,993
	D3D	0,082	0,056	0,176	0,103	0,069	84,173
Grade_VEMOS2009	D2D	0,050	0,042	0,131	0,067	0,049	96,286
	D3D	0,077	0,051	0,187	0,103	0,075	98,354
VEMOS2014	D2D	0,056	0,047	0,103	0,066	0,038	68,555
	D3D	0,080	0,053	0,179	0,102	0,070	87,389
GSRM 2.1 (2014)	D2D	0,072	0,054	0,112	0,082	0,042	58,036
	D3D	0,100	0,073	0,140	0,113	0,059	59,117
GEODVEL2010	D2D	0,065	0,059	0,101	0,073	0,037	57,268
	D3D	0,088	0,064	0,158	0,105	0,063	71,872
SOPAC(2004)	D2D	0,059	0,054	0,100	0,068	0,037	63,185
	D3D	0,082	0,059	0,179	0,104	0,069	83,932
REVEL2000	D2D	0,061	0,057	0,099	0,069	0,037	61,178
	D3D	0,083	0,062	0,182	0,105	0,070	83,710
NNR - NUVEL1A	D2D	0,063	0,059	0,099	0,071	0,036	57,360
	D3D	0,087	0,064	0,168	0,106	0,066	75,618
PB2002	D2D	0,063	0,059	0,098	0,071	0,036	57,041
	D3D	0,087	0,064	0,167	0,106	0,066	75,307

A Figura 80 ilustra os valores da média das discrepâncias planimétricas e os coeficientes de variação.

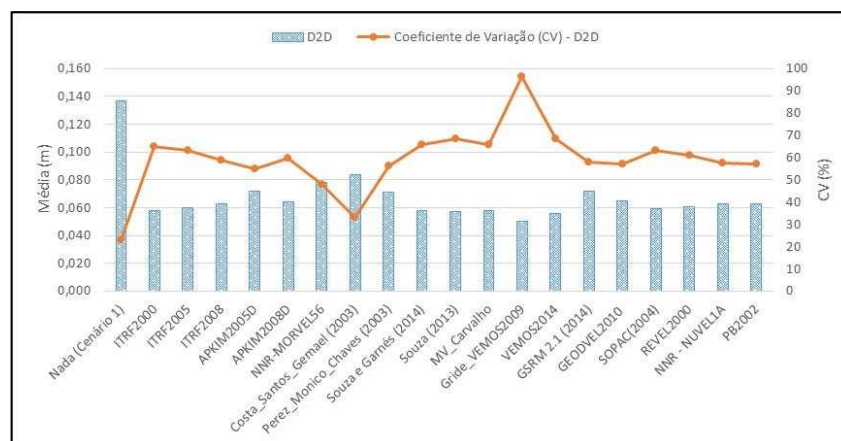


Figura 80 - Média e coeficiente de variação para as D2D.

A Figura 80 permite visualizar que o menor CV foi obtido para o procedimento Nada (Cenário 1). O maior CV ocorreu com o emprego da grade do VEMOS2009. Segundo Fonseca e Martins (2010), o $CV \leq 15\%$ corresponde a baixa dispersão; $15\% < CV < 30\%$, média dispersão; e $CV \geq 30\%$, alta dispersão. Portanto, observando a medida estatística CV na Tabela 94, verifica-se média dispersão para não compatibilização de referencial e época e alta dispersão para o uso dos 19 modelos de velocidades associados à mudança de referencial.

A Figura 81 ilustra os valores dos RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais calculados com base nas discrepâncias obtidas nas estações UNPA, PDE3, PATA, CHIM, ESQU e CHLT.

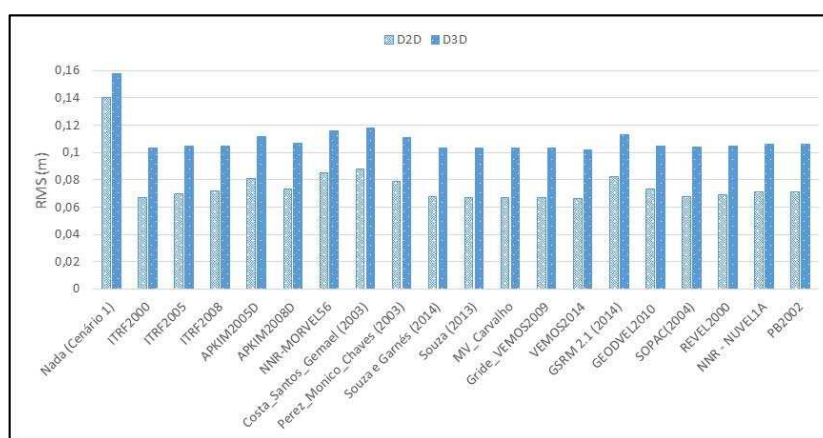


Figura 81 - RMS_{D2D} e RMS_{D3D}.

A partir dos valores dos RMS_{D2D} e com base na Figura 81 pode-se observar que a pior situação é quando desconsidera-se o efeito de deslocamento das estações devido ao movimento da placa tectônica e a mudança de sistema de referência. O valor do RMS_{D2D} foi de 0,140 m e difere de 0,052 m para os valores obtidos das coordenadas transformadas e atualizadas com uso do modelo Costa, Santos e Gemael (2003). Em relação à melhor opção de modelo, a diferença sobe para 0,074 m.

Ranqueando os valores dos RMS_{D2D} do menor para o maior valor verifica-se que os cinco primeiros modelos de 19 (VEMOS2014, ITRF2000, Souza (2013), MV_Carvalho, Grade_Vemos2009) apresentaram valores que variam de 0,066 a 0,067 m. O últimos cinco modelos classificados (Perez, Monico e Chaves (2003), APKIM2005D, GSRM V.2.1, NNR-MORVEL56 e Costa, Santos e Gemael (2003) apresentaram valores para esse RMS que variam entre 0,079 a 0,088 m.

A Tabela 96 possui os modelos ranqueados que proporcionaram menores valores para o RMS_{D2D} obtidas com base nos dados de 6 (seis) estações.

Tabela 96 - Uso os modelos ranqueados do menor para o maior valor do RMS_{D2D} .

Posição	Tratamentos	RMS_{D2D} (m)	ΔRMS_{D2D} (m)
1	VEMOS2014	0,066	-
2	ITRF2000	0,067	0,001
3	Souza (2013)	0,067	0,001
4	MV_Carvalho	0,067	0,001
5	Grade_VEMOS2009	0,067	0,001
6	Souza e Garnés (2014)	0,068	0,002
7	SOPAC(2004)	0,068	0,002
8	REVEL2000	0,069	0,003
9	ITRF2005	0,070	0,004
10	NNR - NUVEL1A	0,071	0,005
11	PB2002	0,071	0,005
12	ITRF2008	0,072	0,006
13	APKIM2008D	0,073	0,007
14	GEODVEL2010	0,073	0,007
15	Perez, Monico e Chaves (2003)	0,079	0,013
16	APKIM2005D	0,081	0,015
17	GSRM 2.1 (2014)	0,082	0,016
18	NNR-MORVEL56	0,085	0,019
19	Costa, Santos e Gemaél (2003)	0,088	0,022

A diferença do valor do RMS_{D2D} entre a melhor e a pior situação com o emprego dos modelos é de 0,022 m. A diferença entre o primeiro modelo e os quatro seguintes é de 0,001 m. Pode-se verificar que do primeiro modelo ao décimo quarto a compatibilidade do RMS_{D2D} é milimétrico.

Ressalta-se aqui que a discrepância para a longitude na estação CHIM da ordem de 0,110 m bem diferente das demais discrepâncias para essa componente teve forte influência nos valores D2D encontrados. Verifica-se que a influência na componente longitude é de modo geral, superior à da componente latitude.

A Figura 82 ilustra os *boxplots* das discrepâncias planimétricas obtidas para o posicionamento realizado no Brasil.

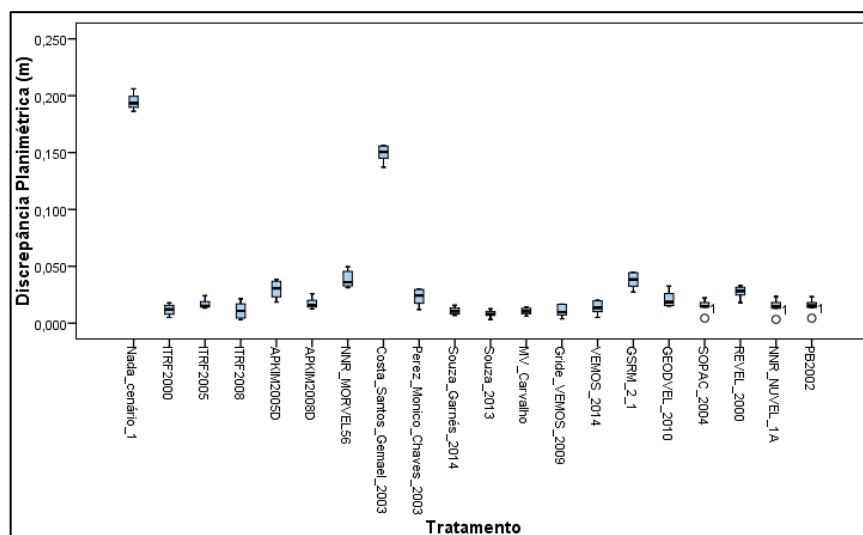


Figura 82 - Boxplots discrepâncias planimétricas.

A Figura 82 permite visualizar a presença de outlier com uso dos modelos SOPAC2004, NNR-NUVEL1A e PB2002. Observa-se também a variabilidade das discrepâncias planimétricas com o emprego dos diferentes modelos de velocidade. Fica evidente, com base no cenário 1, a necessidade da mudança de referencial e a atualização das coordenadas.

A Tabela 97 fornece medidas estatísticas das discrepâncias posicionais obtidas com base no emprego do AUSPOS. As discrepâncias foram calculadas comparando as coordenadas transformadas e atualizadas do IGB08 (ITRF2008, época 2015,954) para o SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4).

Tabela 97 - Estatísticas para as discrepâncias posicionais.

Tratamento	D	Medidas estatísticas					
		Média (m)	Mediana (m)	AT (m)	RMS (m)	DP (m)	CV (%)
Nada (Cenário 1)	D2D	0,195	0,193	0,020	0,195	0,007	3,76
	D3D	0,198	0,198	0,020	0,198	0,007	3,77
ITRF2000	D2D	0,012	0,012	0,013	0,013	0,005	42,51
	D3D	0,022	0,019	0,035	0,025	0,012	56,72
ITRF2005	D2D	0,017	0,015	0,011	0,017	0,004	24,55
	D3D	0,026	0,025	0,028	0,027	0,010	36,81
ITRF2008	D2D	0,011	0,011	0,019	0,013	0,007	64,16
	D3D	0,024	0,024	0,042	0,028	0,014	56,37
APKIM2005D	D2D	0,030	0,031	0,020	0,031	0,008	26,46
	D3D	0,037	0,037	0,021	0,037	0,007	20,00
APKIM2008D	D2D	0,017	0,016	0,014	0,018	0,005	28,41
	D3D	0,027	0,025	0,026	0,028	0,009	34,32
NNR-MORVEL56	D2D	0,038	0,036	0,018	0,039	0,007	19,14
	D3D	0,044	0,044	0,019	0,044	0,008	17,23

Costa, Santos e Gemael (2003)	D2D	0,149	0,151	0,019	0,149	0,008	5,25
	D3D	0,151	0,151	0,023	0,151	0,009	5,66
Perez, Monico e Chaves (2003)	D2D	0,023	0,024	0,018	0,024	0,008	32,86
	D3D	0,031	0,032	0,024	0,032	0,008	25,25
Souza e Garnés (2014)	D2D	0,011	0,010	0,009	0,011	0,003	32,20
	D3D	0,022	0,022	0,032	0,024	0,011	51,29
Souza (2013)	D2D	0,008	0,008	0,009	0,009	0,003	38,71
	D3D	0,020	0,019	0,034	0,023	0,012	61,25
MV_Carvalho	D2D	0,010	0,010	0,008	0,011	0,003	29,33
	D3D	0,021	0,021	0,032	0,024	0,011	52,98
Grade_VEMOS2009	D2D	0,011	0,010	0,013	0,012	0,005	49,78
	D3D	0,021	0,018	0,029	0,023	0,010	47,88
VEMOS2014	D2D	0,014	0,013	0,015	0,015	0,006	44,22
	D3D	0,024	0,021	0,034	0,026	0,012	49,77
GSRM 2.1 (2014)	D2D	0,038	0,038	0,018	0,038	0,007	18,72
	D3D	0,043	0,045	0,016	0,044	0,006	13,20
GEODVEL2010	D2D	0,021	0,019	0,018	0,022	0,007	33,86
	D3D	0,032	0,031	0,033	0,034	0,012	36,13
SOPAC(2004)	D2D	0,015	0,015	0,018	0,016	0,006	40,02
	D3D	0,024	0,021	0,030	0,026	0,012	48,10
REVEL2000	D2D	0,027	0,028	0,015	0,028	0,005	19,73
	D3D	0,034	0,032	0,029	0,035	0,011	31,34
NNR - NUVEL1A	D2D	0,015	0,015	0,020	0,016	0,007	45,50
	D3D	0,024	0,021	0,030	0,026	0,012	48,76
PB2002	D2D	0,015	0,015	0,019	0,016	0,006	41,46
	D3D	0,024	0,021	0,030	0,027	0,012	47,51

A Figura 83 ilustra os valores da média das discrepâncias planimétricas e os coeficientes de variação para as estações localizadas no Brasil.

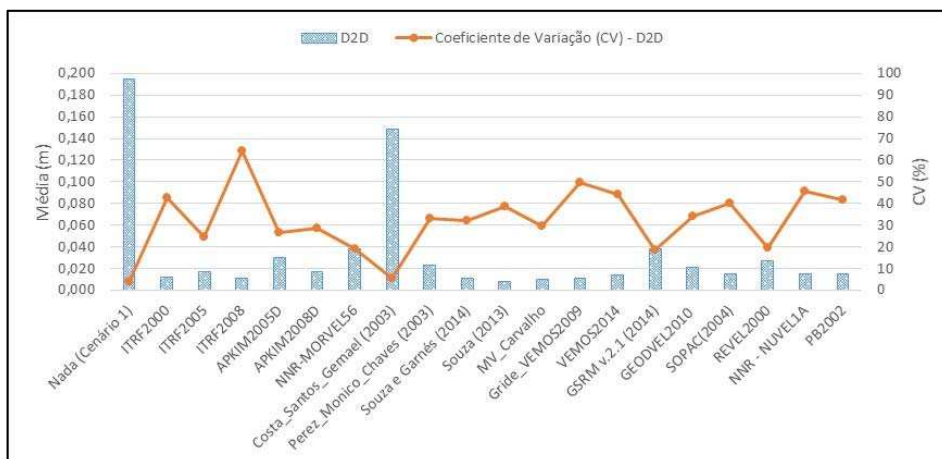


Figura 83 - Média e coeficiente de variação para as D2D.

A Figura 83 permite visualizar que o menor CV ocorreu quando não foi compatibilizado o referencial e época das coordenadas envolvidas (Nada – Cenário 1) e o maior CV ocorreu com o emprego do modelo ITRF2008. Seguindo a classificação dada

em Fonseca e Martins (2009), proporcionaram baixa dispersão da D2D o modelo de Costa, Santos e Gemael (2003) e a não realização da mudança de referencial e atualização das coordenadas. Os modelos GSRM v.2.1, NNR-MORVEL56, REVEL2000, ITRF2005, APKIM2005D, APKIM2008D, MV_Carvalho proporcionaram variabilidade média e os demais alta dispersão.

A Figura 84 ilustra os valores dos RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais calculados com base nas discrepâncias planimétricas e tridimensionais obtidas nas estações de interesse.

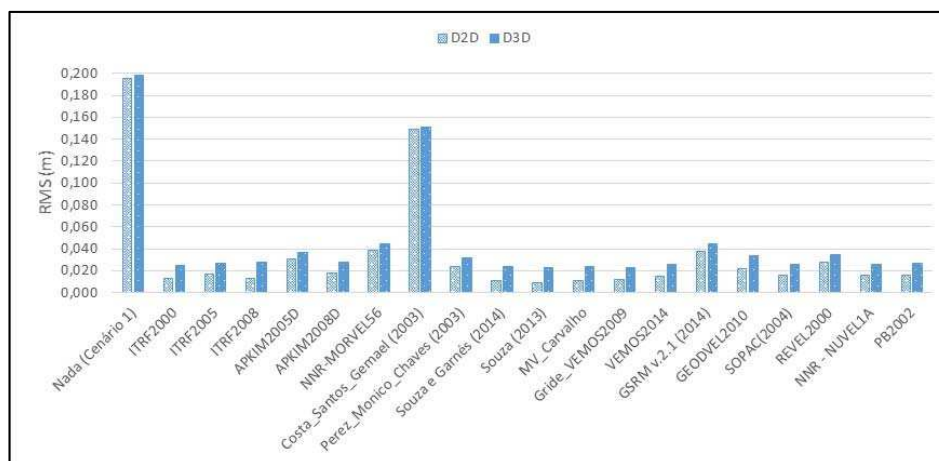


Figura 84 - RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais.

A partir dos valores dos RMS das discrepâncias planimétricas e com base na Figura 84 observa-se que a pior situação é quando desconsidera-se o efeito de deslocamento das estações devido ao movimento da placa tectônica e a mudança de sistema de referência. O valor do RMS_{D2D} foi de 0,195 m e difere de 0,046 m para os valores obtidos das coordenadas transformadas e atualizadas com uso do modelo Costa, Santos e Gemael (2003). Em relação à melhor opção de modelo, a diferença sobe para 0,186 m.

Ranqueando os valores dos RMS_{D2D} do menor para o maior valor, verifica-se que os seis primeiros modelos de 19 (Souza (2013), Souza e Garnés (2014), MV_Carvalho, Grade_VEMOS2009 e ITRF2000) apresentaram valores que variam de 0,009 a 0,013 m. O últimos seis modelos classificados Perez_Monico_Chaves_2003, REVEL2000, APKIM2005D, GSRM v.2.1, NNR-MORVEL56 e Costa, Santos e Gemael (2003) apresentaram valores para esse RMS que variam entre 0,024 a 0,149 m.

É importante salientar que o intervalo de tempo empregado na atualização das coordenadas na Argentina da época 2015,594 para a época 2006,632 é de 8,962 anos e no Brasil da época 2015,594 para a época 2000,4 é de 15,194 anos.

A Tabela 98 possui os modelos ranqueados que proporcionaram menores valores para o RMS das discrepâncias planimétricas obtidas com base nos dados de 6 estações.

Tabela 98 - Uso os modelos ranqueados do menor para o maior valor do RMS_{D2D} .

Posição	Tratamentos	RMS_{D2D} (m)	ΔRMS_{D2D} (m)
1	Souza (2013)	0,009	-
2	Souza e Garnés (2014)	0,011	0,002
3	MV_Carvalho	0,011	0,002
4	Grade_VEMOS2009	0,012	0,003
5	ITRF2000	0,013	0,004
6	ITRF2008	0,013	0,004
7	VEMOS2014	0,015	0,006
8	SOPAC(2004)	0,016	0,007
9	NNR - NUVEL1A	0,016	0,007
10	PB2002	0,016	0,007
11	ITRF2005	0,017	0,008
12	APKIM2008D	0,018	0,009
13	GEODVEL2010	0,022	0,013
14	Perez, Monico e Chaves (2003)	0,024	0,015
15	REVEL2000	0,028	0,019
16	APKIM2005D	0,031	0,022
17	GSRM v.2.1 (2014)	0,038	0,029
18	NNR-MORVEL56	0,039	0,030
19	Costa, Santos e Gemaél (2003)	0,149	0,140

A Tabela 98 fornece elementos que permitem distinguir claramente o efeito no posicionamento planimétrico devido a escolha do modelo de velocidade da placa SOAM. Possibilita também verificar que os modelos de Souza (2013), Souza e Garnés (2014) e MV_Carvalho proporcionaram menores valores para o RMS_{D2D} .

Como os modelos de movimento são baseados no deslocamento horizontal não há diferenças no valor médio das discrepâncias altimétricas no emprego dos diferentes modelos.

Nesse experimento foi possível verificar a necessidade da mudança de referencial e atualização das coordenadas obtidas com o AUSPOS ou outro serviço/ferramenta que disponibilize coordenadas no referencial e época das efemérides precisas IGS e que necessitem de coordenadas na época e referencial adotado em cada país.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, foram estimados os 14 parâmetros da transformação de Helmert para mudança de referencial do ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000 (ITRF2000) e vice-versa que foram denominados de PT_Carvalho e de um modelo de velocidade para a placa SOAM chamado de MV_Carvalho. Foi possível também o desenvolvimento de um aplicativo computacional (GEO_REF_TRAFN_ATUALI) que automatizou os procedimentos do cálculo das velocidades das estações com base em diferentes modelos geofísicos e geodésicos, atualização das coordenadas e mudança de referencial das coordenadas e velocidades.

Salienta-se que os modelo de velocidade implementados são para o cálculo das velocidades das estações localizados na placa tectônica Sul-Americana. Há opção de determinar as velocidades das estações de interesse por outras fontes e importá-las no aplicativo para uso. Ressalta-se, porém, que as velocidade inseridas deverão estar no mesmo referencial das coordenadas de origem.

As velocidades das estações calculadas com uso de interpolação pelo inverso da distância com base na grade VEMOS2009 no programa desenvolvido são compatíveis com as obtidas com o aplicativo TREVel. Ressalta-se também que o GEO_REF_TRAFN_ATUALI e o TREVel realizam a mudança de referencial das velocidades do ITRF2005 para o referencial das coordenadas de origem.

As velocidades calculadas com base em alguns modelos de velocidade para placa SOAM no GEO_REF_TRAFN_ATUALI foram comparadas com as fornecidas com o emprego da ferramenta *Plate Motion Calculator*, disponibilizada pelo UNAVCO¹ e foram observados os mesmos resultados.

Os resultados das atualizações e mudanças de referenciais das coordenadas e velocidades com base nos parâmetros disponibilizados pelo IERS e IBGE-PPP com o uso do GEO_REF_TRAFN_ATUALI são compatíveis com as ferramentas e serviços disponíveis para uso *online*, tais como o TRX²; EPN³; HTDP⁴; TREVel⁵.

Foi verificado que o emprego das coordenadas das estações nas realizações ITRF2000, ITRF2005 ou ITRF2008 para uma mesma época no cálculo da velocidade de uma estação com base em determinado modelo de velocidade, proporciona os mesmos valores de velocidades. No uso da grade do VEMOS2009 no

¹ <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>

² <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/trx.php>

³ http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/index.php

⁴ http://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/HTDP/htdp_p1.prl

⁵ <http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/pps-on-line/trevel/>

GEO_REF_TRAFN_ATUALI isso não acontece, pois as velocidades obtidas com este modelo são transformadas do ITRF2005 para os referenciais das coordenadas de origem (ITRF2000 e ITRF2008). Portanto, ao se realizar a determinação posicional no referencial e época destino é necessário disponibilizar as coordenadas e velocidades, para que sendo necessário, seja possível recuperar, via cálculo, as coordenadas e velocidades no referencial e época origem.

O cálculo das velocidades no referencial origem poderá ser realizado considerando abordagem diferente que dependerá da escolha dos modelos obtidos por observações da geodésia espacial. Considerando que modelo de movimento tenha sido obtido com base nas coordenadas e velocidades em determinado referencial, seria possível teoricamente considerar que as velocidades obtidas com base nesse modelo calculado estejam no mesmo referencial que o gerou. Exemplificando, se forem aplicadas coordenadas e velocidades no ITRF2008, o modelo gerado proporcionará velocidades neste referencial. Desse modo, para efetuar a atualização das coordenadas no ITRF2000 de uma época (t_0) para (t) com base no modelo, as coordenadas deveriam ser transformadas do ITRF2000 para ITRF2008 e empregadas no modelo gerado para o cálculo das velocidades. As velocidades calculadas no ITRF2008 devem ser convertidas para o ITRF2000 antes de utilizá-las na atualização das coordenadas. Portanto, recomenda-se estudos que permitam quantificar as implicações dessa abordagem na determinação posicional.

As validações interna e externa foram realizadas no experimento 1. Na fase de validação interna foram detectadas discrepâncias significativas para o critério selecionado e desse modo, das 58 estações selecionadas *a priori*, 10 foram descartadas e novos parâmetros estimados. Nessa etapa houve melhora de 44% para o RMS para a latitude, 30% para longitude e de 40,9% para altitude elipsoidal. Na validação externa (experimento 1), pôde-se comparar os resultados da aplicação dos parâmetros PT_Carvalho, IERS e IBGE-PPP e dos 19 modelos de velocidade para atualização das coordenadas. Foi observado que para um mesmo conjunto de parâmetros, o emprego dos diferentes modelos de velocidade proporcionam valores de discrepâncias posicionais diferentes. Nesse experimento, foi verificado que a adoção dos parâmetros PT_Carvalho e dos 19 modelos de velocidade proporcionou um valor médio da diferença dos valores dos RMS_{D2D} de 0,001 m e de 0,006 m para o emprego dos parâmetros do IBGE-PPP com os diferentes modelos de velocidade em relação aos valores obtidos com o IERS.

O uso dos parâmetros de transformação de PT_Carvalho em conjunto com os modelos de velocidade de MV_Carvalho e VEMOS2014 proporcionaram os menores valores (0,013 m) para o RMS_{D2D} . Os maiores valores de 0,042 m e 0,135 m para o RMS_{D2D} foram obtidos, respectivamente, com emprego dos modelos NNR-MORVEL56 e Costa, Santos e Gemaél (2003). O emprego dos parâmetros do IBGE-PPP em conjunto com o modelo de velocidade ITRF2005 forneceu o RMS das discrepâncias planimétricas de 0,013 m e os maiores valores de 0,050 m e 0,133 m para o RMS_{D2D} foram obtidos, respectivamente, com emprego dos modelos NNR-MORVEL56 e Costa, Santos e Gemaél (2003).

O emprego dos parâmetros do IERS em conjunto com os modelos de velocidade de Souza e Garnés (2014), Souza (2013) e PT_Carvalho forneceram RMS das discrepâncias planimétricas de 0,012 m e os maiores valores de RMS das discrepâncias planimétricas de 0,041 m e 0,138 m foram obtidos, respectivamente, com emprego dos modelos NNR-MORVEL56 e Costa, Santos e Gemaél (2003). Em relação à média dos RMS_{D2D} obtidas com base em todos os modelos de velocidade com uso de cada conjunto de parâmetros, não foi detectada diferença no uso dos parâmetros de PT_Carvalho e IERS, mas encontra-se uma diferença de 18,19% no emprego dos parâmetros do IBGE-PPP em relação à estes. Em termos médios para o RMS das discrepâncias tridimensionais foram encontrados, respectivamente, 0,044 m, 0,047 m e 0,040 m para associação dos modelos de velocidade com os PT_Carvalho, IBGE-PPP e IERS. Portanto, foi possível verificar concordância das coordenadas obtidas com emprego dos parâmetros determinados pelo PT_Carvalho, IBGE-PPP e IERS e escolher, para cada caso, a combinação modelo de velocidade e parâmetros de transformação que propiciam melhor qualidade no posicionamento.

No experimento 2 foram realizados 7 transportes de coordenadas no Brasil e na Argentina com uso de duas estações de controle e uma estação a ser determinada. No cenário 1, não houve mudança de referencial e atualização das coordenadas das estações de controle e de interesse. No cenário 2, na Argentina foi observado que as coordenadas das estações de controle inseridas no ajustamento em alguns casos modificou o resultado do teste qui-quadrado, mas o mesmo não ocorreu no Brasil. Em termos de RMS_{D2D} foi encontrado o valor 0,026 m para o cenário 1 e o NNR-MORVEL55, o valor 0,024 para uso do Costa, Santos e Gemaél (2003) e 0,025 m para os demais modelos de velocidade. Desse modo, variação total do RMS_{D2D} de 0,002 m com uso das diferentes abordagens. Portanto, no transporte de coordenadas no Brasil, com base no experimento realizado,

não foi detectado melhora significativa na qualidade do posicionamento com compatibilização de referencial e época. Os transportes de coordenadas realizados na Argentina foram encontrados RMS_{D2D} de 0,088 m para o cenário 1, RMS_{D2D} de 0,093 m para uso da grade do VEMOS2009 e de 0,085m a 0,086 m para o emprego dos demais modelos associados à mudança de referencial. Portanto, nota-se que também não houve melhora significativa com compatibilização de referencial e época.

Para verificar as implicações do emprego dos diferentes modelos de velocidades e a mudança de referencial foram selecionadas 28 estações da rede RAMSAC/ SIRGAS-CON. Após procedimentos de transformação e atualização foi observado que os modelos Souza (2013), MV_Carvalho e Souza e Garnés (2013) apresentaram menor valor (0,034 m) para o RMS das discrepâncias planimétricas e os maiores valores 0,095 m e 0,113 foram obtidos, respectivamente, por Costa, Santos e Gemaél (2003) e para o cenário 1. Portanto, nota-se diferença de 69,7% no valor do RMS da discrepância planimétrica obtidos com os melhores modelos em relação ao cenário 1. Diferença de 63,9% no valor do RMS das D2D entre o menor valor (Souza (2013), MV_Carvalho e Souza e Garnés (2013)) e o maior valor (Costa, Santos e Gemaél (2003)). Portanto, esse experimento mostrou a importância da mudança de referencial e da escolha do modelo de velocidade na atualização das coordenadas.

Foi possível verificar nos experimentos 2 e 3 que no posicionamento em rede e no transporte de coordenadas que não houve melhora com a mudança de referencial e atualização das coordenadas. De modo semelhante, não foram detectadas diferenças significativas no emprego dos diferentes modelos de velocidades. Um nova abordagem foi dada ao experimento 3 no experimento 4, onde foram empregadas as coordenadas das estações de controle às provenientes da solução semanal da rede SIRGAS-CON. No cenário 1 – b onde não foram aplicados os procedimentos de transformação e atualização foi obtido o maior valor para os RMS das discrepâncias planimétricas e tridimensionais. Comparando o cenário 1–a onde as coordenadas das estações de controle empregadas no ajustamento injuncionado estão em SIRGAS2000 (ITRF2000, época 2000,4) com as obtidas no cenário 2 não foi observado melhora na qualidade do posicionamento. Porém, neste caso, foi verificado variação no valor de RMS das D2D de até 0,152 m. Os modelos ITRF2000 e Souza (2013) apresentaram valor igual a 0,024 m. Portanto, ao se empregar as coordenadas da solução semanal da rede SIRGAS-CON das estações de controle é necessário efetuar a mudança de referencial e época oficiais no Brasil para que se consiga o posicionamento de melhor qualidade. Na Argentina, houve melhora em termos de RMS

das discrepâncias planimétricas de 12,26% na consideração da atualização e da mudança de referencial das coordenadas com emprego do modelo REVEL 2000 em relação ao cenário 1–a e de 27,66% em relação ao cenário 1–b. Houve diferença de 0,02 m no valor do RMS da discrepância planimétrica entre REVEL2000 e GSRM v.2.1. A diferença no valor do RMS_{D2D} entre o modelo REVEL2000 e o modelo MV_Carvalho é de 2,85%. Ao contrário do que ocorreu no Brasil, o modelo Costa, Santos e Gemael (2003) apresentou bom desempenho na atualização das coordenadas na Argentina e diferiu do REVEL2000 em 0,001 m, ou seja, 0,73%.

No experimento 5, o AUSPOS foi empregado para posicionamento relativo, com solução em rede, no Brasil e na Argentina. As coordenadas estimadas no ITRF2008 (IGb08, época 2015,594) foram transformadas com base nos parâmetros do IERS e atualizadas com o emprego de 19 modelos de velocidade. Foram calculadas as discrepâncias posicionais considerando e não considerando a mudança de referencial e atualização das coordenadas das estações de interesse. Pôde-se observar que no Brasil, a desconsideração desses procedimentos conduziu a RMS_{D2D} de 0,195 m e RMS_{D3D} de 0,198. Os melhores resultados foram obtidos considerando os modelos de Souza (2013), Souza e Garnés (2014) e MV_Carvalho que apresentaram, respectivamente, valores de RMS_{D2D} de 0,009 m e 0,011 m e 0,011 m. Verifica-se diferenças de 93,96% e 76,62% dos valores do RMS_{D2D} com uso do modelo de Souza (2013) em relação aos modelos de Costa, Santos e Gemael (2003) e NNR-MORVEL56. A diferença sobe para 95,38% quando compara-se o RMS_{D2D} com uso do modelo Souza (2013) com os valores obtidos sem aplicação dos procedimentos de mudança de referencial e atualização. Na Argentina, os melhores resultados foram obtidos considerando os modelos de VEMOS2014, ITRF2000, Souza (2013), MV_Carvalho e Grade_VEMOS2009 que apresentaram valores de RMS_{D2D} que variam de 0,066 m a 0,067 m. Verifica-se diferenças de 25,00% e 52,86% dos valores do RMS_{D2D} com uso VEMOS2014 em relação modelo NNR-MORVEL56 e a desconsideração da mudança de referencial e atualização das coordenadas. Ressalta-se que, no Brasil, a diferença de tempo entre a data do posicionamento e a época das coordenadas no referencial oficial é igual a 15,194 anos e na Argentina de 8,962 anos. Ou seja, quase o dobro do período na Argentina. Há também o fato de no Brasil ter que se realizar a transformação do ITRF2008 para o ITRF2000 e na Argentina do ITRF2008 para o ITRF2005. Porém, algumas estações na Argentina são mais susceptíveis a efeitos de terremotos de grande magnitude que ocorrem neste país e em países vizinhos. Portanto, assim como no experimento 1, fica evidente a necessidade

a mudança de referencial e atualização das coordenadas para que se tenha um posicionamento com menor tendência posicional.

Embora o modelo de velocidade MV_Carvalho tenha sido desenvolvido com base em estações localizadas apenas no Brasil, o mesmo apresentou resultados concordantes com outros modelos empregados na Argentina.

Conclui-se que as coordenadas obtidas diretamente no referencial e época das efemérides precisas, como por exemplo, aplicação do AUSPOS, CSRS-PPP, APPS, OPUS e GAPS deverão ser transformadas e atualizadas para os referenciais oficiais de cada país. No posicionamento relativo no Brasil e na Argentina com base no processamento no LGO e emprego das coordenadas das estações de seus descritivos transformadas e atualizadas para os referenciais e épocas das efemérides precisas não foram detectados melhoras significativas com emprego dos procedimentos. Porém, no posicionamento em rede na Argentina, com uso das coordenadas das estações de controle provenientes da rede SIRGAS-CON e aplicação dos procedimentos de mudança de referencial e atualização de coordenadas, foi detectada melhora na qualidade do posicionamento; para o Brasil, embora não tenha sido detectado melhora, dependendo da escolha do modelo de velocidade, o valor da discrepância posicional poderá aumentar, piorando a qualidade do posicionamento.

Para trabalhos futuros recomenda-se a implementação de ferramentas *online* para cálculo de velocidade com base nos modelos geofísicos/geológicos e geodésicos e na grade do VEMOS2009 bem como a realização da mudança de referencial das coordenadas, velocidades e atualização posicional das estações. Sugere-se, também, a inclusão dados de estações na Argentina e em outros países localizados na placa SOAM com intuito de melhorar o modelo MV_Carvalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAMIMI, Z.; SILLARD, P.; BOUCHER, C. **ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications**. Journal of Geophysical Research, Vol. 107, issue B10, pg. ETG 2-1 – ETG 2-19, 2002. Disponível em < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001JB000561/abstract> >. Acesso em 22/10/2015.

ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, J.; LEGRAND, B. GARAYT, B.; BOUCHER, C. **ITRF2005: a new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of stations positions and Earth Orientation Parameters**. Journal of Geophysical Research. Vol. 112, issue B9, B09401, 2007. Disponível em< <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JB004949/epdf> >. Acesso em 22/10/2015.

ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L. **ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference frame**. Journal of Geodesy. Dec. 1, 2011. Vol. 85:457-473p Springer. Disponível em <http://www.iers.org/nn_11216/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote37/tn37__app2,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/tn37_app2.pdf>. Acesso 13/07/2013.

ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L. **Analysis and results of ITRF2008**. (IERS Technical Note; 37) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2012. 54 pp., ISBN 978-3-86482-046-5 (print version). Disponível em<<http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn37.html?nn=94912>>. Acesso em 04/11/2015.

ALTAMIMI, Z., MÉTIVIER, L., COLLILIEUX, X. **ITRF2008 plate motion model**. Journal of Geophysical Research. 2012. Vol.117, B07402. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JB008930/full>> Acesso em:12/08/2015.

ALTAMIMI, Z. **ITRF and IGS Reference Frame Relationship**.2003. Disponível em<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/misc/igsar03/section2/2.4_Altamimi.pdf> Acesso em:14/07/2013.

ALTAMIMI, Z; COLLILIEUX, X. **IGS contribution to the ITRF**. Journal of Geodesy. 2009.Vol.83, 375-383 pg. Disponível em: <http://acc.igs.org/trf/igs-in-itrif_jog09.pdf> Acesso em:14/07/2013.

ANDRADE, M.G. **Anisotropia Sísmica do Manto Superior na América do Sul com Divisão de Ondas SKS**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ARGUS, D.F.; GORDON, R.G.; HEFLIN, M.B.; MA, C.; EANES, R.J.; WILLIS, P.; PELTIER, W.R.; OWEN, S.E. **The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's center from space geodesy**. Geophysical Journal International, Vol.180, 913–960. 2010. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-246X.2009.04463.x/abstract>> Acesso em:12/08/2015.

ARGUS, D. F., GORDON, R.G. **No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1**. Geophysical Research Letters, Vol. 18, n° 11, 2039-2042 pp. November, 1991. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/91GL01532/abstract>> Acesso em:12/08/2015.

ARGUS, D. **Defining the translational velocity of Reference frame of Earth. Geophysical**. Journal International. Vol. 169, issue 3, pp 830 – 838, 2007. Disponível em<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-246X.2007.03344.x/abstract>>. Acesso em 22/10/2015.

ARGUS, D. F., GORDON, R. G., DEMETS. **Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame**. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. Vol. Issue 11. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GC003751/abstract>> Acesso em:12/08/2015.

BAARDA, W. **A testing procedure for use in geodetic networks**. Publications in Geodesy, New Series, vol. (5), Netherlands Geodetic Commission, 1968.

BIRD, P. **An updated digital model of plate boundaries**. Geochemistry Geophysics Geosystems, Vol. 4, nº3, 2003. Disponível em: <http://peterbird.name/publications/2003_PB2002/2001GC000252.pdf>. Acesso em 22/10/2015.

BLITZKOW, D.; MATOS, A.C.C. **A evolução dos referenciais usados em geodésia: a era moderna**. Boletim de Ciências Geodésicas. V.8, nº1. Pp. 3 – 16. 2007. Disponível em < <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/bcg/article/download/1410/1164>. >. Acesso em: 21/10/2015

BOCK, Y.; PRAWIRODIRDIO, L.; FANG, P.; JAMASON, P.; WADOWINSKI, SOPAC's **Instantaneous Global Plate Motion Model**. Joint Assembly: Contributions to a North America Fixed Reference Frame, Montreal, Canada, May 18, 2004. Disponível em < http://sopac.ucsd.edu/input/presentations/SOPAC_NAREF.ppt>. Acesso em 28/07/2015.

BOUCHER, C.; ALTAMIMI, Z.; SILLARD, P.; FEISSEL-VERNIER, M. **The ITRF2000**. IERS Technical Note.:31. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. Disponível em:< <http://www.iers.org/ IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn31.html>>. Acesso em: 28/07/2015.

BRUNINI, C.; SÁNCHEZ, L. **Geodetic Reference Frame for the Americas: advancing Geodesy in Latin America and the Caribbean**. Disponível em: <http://www.gim-international.com/content/article/geodetic-reference-frame-for-the-americas>. Acesso em 21/10/2015.

BRUYNINX, C.; ALTAMIMI, Z.; CAPORALI, A.; KENYERES, A.; LIDBERG, M.; STANGI, G.; TORRES, J.A. **Guidelines for EUREF Densifications**. IAG sub-commission for the European Reference Frame – EUREF.2013. 9p. Disponível em:< ftp://epncb.oma.be/pub/general/Guidelines_for_EUREF_Densifications.pdf>. Acesso em 14/07/2013.

CALAIS, E. **Elements of Geodesy: Part 1: Shape and Figure of the Earth, potential and geoid, terrestrial coordinate systems**. 2008. Disponível em < <http://www.geologie.ens.fr/~ecalais/teaching/>>. Acesso em 07/11/2015.

CALDAS, F. L.; CHAVES, J.C. **Determinação do modelo de deformação da rede GNSS/SP com base na teoria da elasticidade**. Revista Brasileira de Cartografia. N°67/ 1p. 71-82. 2015. Disponível em:< <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/818/761> >. Acesso em 21/10/2015.

CAMISAY, M.F; STRIEWE, E; MACKEN, M.V. **Los marcos de referencia en el posicionamiento satelital a tiempo real**. GEOACTA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires dic. V.38, nº 2, p.183-193, 2013. Disponível em:< http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-77442013000200007&script=sci_arttext>. Acesso em 22 julho de 2015.

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W.R. **Posicionamento geodésico referenciado ao SIRGAS2000 (ITRF2000) com base em serviços e ferramentas gratuitas disponíveis na Internet.** In. V Simpósio Brasileira de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2014. Recife – PE 12 a 14 de novembro. Disponível em< <https://www.ufpe.br/geodesia/images/simgeo/papers/27-455-1-PB.pdf> >. Acesso 23 jun. 2015.

CARVALHO, A.S.; DA SILVA, J. A.; DAL POZ, W. R. **Análise estatística do posicionamento relativo a partir do AUSPOS.** Boletim de Ciências Geodésicas. V.21, nº1. 2015. Disponível em < <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/bcg/article/view/40436/24670>>. Acesso em: 21/10/2015

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W.R.; LAROCCHA, A.P.C. **Compatibilização de referenciais e coordenadas e velocidades com estimativa de precisão.** Boletim de Ciências Geodésicas. V.21, nº3. 2015. Disponível em < <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/bcg/article/view/43215/26238>>. Acesso em: 21/10/2015.

COSTA, S.M.A; SANTOS, M.C.; GEMAEL, C. **A velocity field estimation of the Brazilian portion of the SOAM plate.** GPS Solutions. Dec. 1, 2003. Vol. 7:186-193p Springer. Disponível em< <http://gge.unb.ca/Personnel/Santos/GPSSolutions2003.pdf>>. Acesso 13/07/2013.

COSTA, M. F. **Modelagem da função covariância para transformação de referenciais geodésicos por colocação.** 112 f. TESE (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos quadrados.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas. Editora da UFPR, Curitiba, 2004.

DA SILVA, A. L., COSTA, S. M. A., VAZ, J. A. **Deslocamento das estações SIRGAS-CON em função do terremoto ocorrido no Chile - uma abordagem do centro de processamento SIRGAS-IBGE.** In. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2010. Recife - PE. Disponível em<www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/.../A_91.pdf >. Acesso 05 jun. 2013.

DeMETs, C.; GORDON, R.; ARGUS, D. F.; STEIN, S. **Current plate motions.** Geophysical Journal International, vol. 101, nº 2 pp 425-478, 1990. Disponível em < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x/abstract>>. Acesso em 22/10/2015.

DeMETs, C.; GORDON, R.; ARGUS, D. F.; STEIN, S. **Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions.** Geophysical Research Letters, vol. 21, nº 20 pp 2191 – 2194, 1994. Disponível em < http://geoscience.wisc.edu/~chuck/PDF/demets_grl94.pdf>. Acesso em 22/10/2015.

DeMETs, C.; GORDON, R.G.; ARGUS, D. **Geologically current plate motions.** Geophysical Journal International, Vol. 181, issue 1, p. 1-80, 2010. Disponível em <

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x/abstract> >. Acesso em 22/10/2015.

DGFI (2013). Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. <http://www.dgfi.tum.de/en/>.

DREWES, H.: **Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models**. In: M. Feissel (Ed.): Geodynamics, IAG Symposia Vol. 119, p377-382, Springer 1998.

DREWES, H., ANGERMANN, D., **The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model 2000 (APKIM2000) as a Geodetic Reference System**, AIG 2001 Scientific Assembly, Budapest, 2-8 Sept 2001; see also DS_APKIM.pdf.

DREWES, H. **The actual plate kinematic and crustal deformation model APKIM2005 as basis for a non-rotating ITRF**. Geodetic Reference Frames, International Association of Geodesy Symposia 134, pp 95-99, 2009. Disponível em < http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-00860-3_15>. Acesso em 22/10/2015.

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L. **Actualización del modelo de velocidades SIRGAS**. In Simposio SIRGAS2014, La Paz, Bolivia, Noviembre 24-26, 2014. Disponível em < [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol19/60_Drewes_et_al_2014_Actualiz](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol19/60_Drewes_et_al_2014_ActualizacionVEMOS.pdf) [acionVEMOS.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol19/60_Drewes_et_al_2014_ActualizacionVEMOS.pdf)>. Acesso em 28/07/2015.

DREWES, H., HEIDBACH, O. **The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean**. In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposia, 136: 657-664.2012.

DREWES, H. **Procesamiento de información GPS com relación a marcos de referencia de épocas diferentes**. In: SIRGAS Workshop, Aguascalientes, México, 9 e 10 de Dezembro de 2004.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G.A. **Curso de Estatística**. 6ª edição. São Paulo: editora ATLAS S.A- 2010.

FRANCO, G.A.G.; MORENO, R.A.G. **Change from ITRF92 epoch 1988.0 to ITRF2000 epoch 2004.0 in Mexico**. In. XXIII International FIG Congress. Munich, Germany, 8 – 13 October 2006. Disponível em < https://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts26/ts26_04_gonzalezfranco_gomezmoreno_0847.pdf>. Acesso em 22/10/2015.

GARNÉS, S.J.A.; SOUZA, W. O. **Comparação de modelos de velocidade da placa tectônica Sul-Americana para redução de coordenadas atuais à época do SGB**. In VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Curitiba, 3 a 5 de dezembro de 2013. Disponível em:<http://www.cbcg.ufpr.br/home/?page_id=601> Acesso: 26/07/2015.

GEOSCIENCE AUSTRALIA (2015). Australian Government - <http://www.ga.gov.au/earth-monitoring/geodesy/ausposonline-gps-processing-service.html>. Acesso em: 22 jan. 2014.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 1994.

GHILANI, C. D. **Adjustment computations: spatial data analysis**. 5th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

GOUDARZI, M. COCARD, M.; SANTERRE, R. **EPC: Matlab software to estimate Euler pole parameters**. GPS Solutions, v. 18 p. 153-162, 2014, Disponível em < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10291-013-0354-4> >. Acesso em 22/10/2015.

GREINER, B. **Euler rotations in plate-tectonic reconstructions**. Computers & Geosciences. V.25, issue 3, pp. 209-216, April, 1999. Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300498001605>>. Acesso em 04 Nov. 2015.

GREGORIUS, T. **GIPSY-OASIS II: How it works**. Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne. 1996. Disponível em < <http://web.gps.caltech.edu/classes/ge167/file/gipsy-oasisIIHowItWorks.pdf> > Acesso em 22/10/2015.

GT2: **Resolução de São Paulo**. 2003. Disponível em < http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/DOCUMENTA_RESOLUCA_OSP_D.pdf>. Acesso em 21/10/2015.

HAASDYK, J., JANSSEN, V (2011). **The many paths to a common ground: A comparison of transformations between GDA94 and ITRF**. International Global Navigation Satellite Systems Society – IGPS Symposium 2011. University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, 1517 November 2011.

HERRING, T. **Geodesy: Treatise on Geophysics (Volume3)**. Elsevier. 2007.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GPS Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, GALILEO & more**. Austria: Springer Wien New York, 2008.

IBGE. FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos - GPS**. Rio de Janeiro, RJ .2008.

IBGE. **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: dezembro 2013**. Disponível em:< <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/> >. Acesso em 14 novembro de 2014.

IBGE. FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Resolução PR nº 1 de 25 de fevereiro de 2005. Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro**, Rio de Janeiro (cidade), 2005. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/legislacao/RPR_01_25fev2005.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2013.

IBGE (2015) – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - http://www.ibge.gov.br/home/mapa_site/mapa_site.php#geociencias. Acesso: 25/06/2015.

IGN (2015) – INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - <http://ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Posgar07>.

IGS (2015) – INTERNATIONAL GNSS SERVICE - <https://igscb.jpl.nasa.gov>. Acesso: 21/10/2015.

INEGI (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponível em < <http://www.inegi.org.mx/>> .Acesso 21/10/2015.

ITRF (2015). INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME, ITRF Solutions, <http://itrf.ensg.ign.fr/>. Acesso: 25/06/2015.

KOUBA, J.; HÉROUX, P. **GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products. GPS Solutions**, Vol.5, n°2, pp. 12-28, 2001. Disponível em <http://link.springer.com/article/10.1007%2FPL00012883> . Acesso em 22/10/2015.

KUANG, S. Geodetic Network Analysis and Optimal Design: concepts and applications. Chelsea: Ann Arbor Press. 1996.

KRAKIWSKY, E. J.; SZABO, D. J.; VANÍČEK, P.; CRAYMER, M. R. **Development and testing of in-context confidence regions for geodetic survey networks**. Technical Report N° 198, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada, 1999

KRAKIWSKY, E.J. **A synthesis of recent advances in the method of least squares**. Technical Report, n° 42. Department of Geodesy and Geomatics Engineering. University of New Brunswick. Fredericton, NB, Canada, 1975.

KREEMER, C., HOLT, W., HAINES, J. **An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation**. Geophysical Journal International, Vol. 154, issue 1, 8-34 p. 2003. Disponível em :< <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x/citedby>>. Acesso em 12/08/2015.

KREEMER, C., BLEWITT, G., KLEIN, E. **A geodetic plate motion and global strain rate model**. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol. 15, issue 10, 3849-3889 p. 2014. Disponível em :< <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014GC005407/abstract>>. Acesso em 12/08/2015.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3rd revised edition. John Wiley & Sons Inc. 464 p. 2004.

LIBERAL, M. L. **Velocidades de las estaciones SIRGAS2000 sobre las placas del caribe y suramericana aplicando los modelos de la UNAVCO y VEMOS2009**. Boletín de Geología, v. 37, n. 2, p. 41-46, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/pdf/boge/v37n2/v37n2a04.pdf>. Acesso em 21/10/2015.

LUGNANI, J.B. **Introdução à fotogrametria**. Imprensa Universitária da UFPR. Curitiba, PR. 1987, 134p.

MARINI, M. C. **Integração da rede GPS ITESP ao Sistema Geodésico Brasileiro**. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, programa de pós- graduação em ciências cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.

MARJANOVIĆ, M., Ž. BAČIĆ, AND T. BAŠIĆ, **Determination of horizontal and vertical movements of the Adriatic microplate on the basis of GPS measurements**, in *Geodesy for Planet Earth*, vol. 136, 2012. edited by S. Kenyon, M. C. Pacino, and U. Marti, pp. 683–688, Springer Berlin Heidelberg.

McCARTHY, D. D. (ed.): **IERS Conventions (1996)**. IERS Technical Note: 21, Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, 1996. [ii], ii, 97 p.

MIRANDA, J.I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005, 425p.:il.

MIKHAIL, E. M.; ACKERMANN, F. **Observation and Least Squares**. New York , IEP, Dun-Donelly Publisher, 1976.

MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2008, 476 p.

MOREIRA, D. M. **Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2010. Disponível em:< http://www.cprm.gov.br/publique/media/diss_danielmoreira.pdf > Acesso em 21/10/2015.

NGA. NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY. **World Geodetic System 1984**: its definition and relationships with local geodetic systems. NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84, Version 1.0.0, July 8, 2014. Disponível em:< <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/> >. Acesso 15/08/2015.

PARK, J.K.; KIM, M.G.; LEE, J.S. **Tectonic motion monitoring of Antarctica using GPS measurements**. *International Journal of Control and Automation*, v. 6, n°2, p. 215-224. 2013. Disponível em www.sersc.org/journals/IJCA/vol6_no2/20.pdf . Acesso em 22/10/2015.

PETIT, G., LUZUM, B. IERS CONVENTIONS 2010. **IERS Technical Note:36**, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6. Disponível em< http://www.iers.org/nn_11216/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>. Acesso em 6 jun. 2013.

PEREZ, J.A.S. **Campo de velocidade para as estações da RBMC e do IGS localizadas na Placa Sul-Americana**: estimativa a partir do processamento de dados GPS. 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, programa de pós- graduação em ciências cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.

PEREZ, J. A. S., MONICO, J. F. G., CHAVES, J. C. **Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case**. *Journal of Global Positioning systems*. Vol. 2, n° 2, 2003.

PIMENTA, A.F.; ZANETTI, M.A.Z.; DALAZOANA, R.; DE OLIVEIRA, R. **ITRF2000 e sua utilização**. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 8, n°1, p.59-70, 2002. Disponível em < <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/bcg/article/view/1414/1168> >.

POMEROL, C.; LAGABRIELLE, Y.; RENARD, M.; GUILLOT, S. **Princípios de Geologia: técnicas, modelos e teorias**. Tradução de MENEGAT, R.; LELARGE, M. L. V. 14. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

PRAWIRODIRDJO, L.; BOCK, Y. **Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations**. Journal of Geophysical Research, v. 109, B8, 15 pp., 2004. Disponível em <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2003JB002944/abstract>>. Acesso em 28/07/2015.

PROL, F. S.; MARCATO JUNIOR, J.; NIEVINSK, F. G.; GOMES, R. L.; PARANHOS FILHO, A.C. **Transformação entre referenciais e cálculo de velocidades através do aplicativo web TREVel**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 66, n. 3, p. 569-579, 2014. Disponível em:<<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/664/701>>. Acesso em 04/11/2015.

RAMOS, M. P.; DAL POZ, W.R.; CARVALHO, A.S. **Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas no PPP**. Boletim de Ciências Geodésicas. No prelo, 2016.

REBISCHUNG, P.; GRIFFITHS, J. RAY, J.; SCHMID, R. COLLILIEUX, X. GARAYT, B. **IGS08: the IGS realizations of ITRF2008**. GPS Solutions, v. 16, p. 483 – 494. 2012. Disponível em <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10291-011-0248-2>>. Acesso em: 22/10/2015.

REBISCHUNG, P.; GARAYT, B.; SCHMID, R.; RAY, J.; COLLILIEUX, X. **IGS08: Elaboration, consequences and maintenance of the IGS realization of ITRF2008**. Geophysical Research Abstracts. Vol. 13, EGU2011- 6850. 2011. Disponível em:<<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/EGU2011-6850.pdf>>. Acesso em 14/07/2013.

REBISCHUNG, P. [IGSMail-6354] **Upcoming switch to IGS08/igs08.atx**. 2011. Disponível em: <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/006346.html>

REBISCHUNG, P. [IGSMail-6663] **IGb08: an update on IGS08**. 2012. Disponível em: <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2012/007853.html>. Acesso em:14/07/2013.

RODRIGUES, D.D. **Rede geodésica de precisão no Estado de Minas Gerais: avaliação de diferentes estratégias de processamento e ajustamento**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SÁNCHEZ L., SEITZ M.: **SIRGAS reference frame realization SIR11P01**. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Munich, doi:10.1594/PANGAEA.835100, 2011.

SÁNCHEZ, L.; SEEMULLER, W.; DREWES, H.; MATEO, L.; GONZÁLEZ, G.; DA SILVA, PAMPILLÓN, J.; MARTÍNEZ, W.; CIOCE, V.; CISNEROS, D.; CIMBARO, S. **Long-Term Stability of the SIRGAS Reference Frame and Episodic Station Movements Caused by the Seismic Activity in the SIRGAS Region**. In: Altamimi Z. and Collilieux X. (Eds.): Reference Frames for Applications in Geosciences, IAG Symposia 138: 153-161, Springer Berlin Heidelberg, 2013.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2nd ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SELLA, G.F, DIXON, T.H; MAO. **REVEL: A Model for Recent Plate Velocities from Space Geodesy**. Journal of Geophysical Research, vol. 107, apr 2002. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000JB000033/abstract>. Acesso em: 17/08/2015.

SIRGAS (2015). Sistema de Referência Geocêntrico para las Américas, Rede SIRGAS-CON. Disponível em <<http://www.sirgas.org/index.php?id=148>>. Acesso: 25/06/2015.

SOLER, T; SNAY, R. A. **Transforming positions and velocities between the International Terrestrial Reference Frame of 2000 and North American Datum of 1983**. Journal of Surveying Engineering, Vol. 130, nº 2, 2004.. Disponível em:<<http://geodesy.noaa.gov/CORS/Articles/SolerSnayASCE.pdf>>. Acesso: 26/07/2015.

SOTO, J.C.B. **Monitoramento das deformações da rede referência do SIRGAS em área com atividade tectônica**. Curitiba – PR, 2006. 124 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

SOUZA, W. O. **Modelagem do movimento da placa tectônica Sul-Americana por meio de dados VLBI e GNSS**. Recife – PE, 2013. 177 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação), programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Pernambuco.

SOUZA, W. O.; GARNÉS, S. J. A. **Modelagem do movimento da placa tectônica Sul-Americana usando as velocidades das estações SIRGAS-CON**. In V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, 12 a 14 de Novembro de 2014. Disponível em:<<https://www.ufpe.br/geodesia/images/simgeo/papers/61-572-1-PB.pdf>> Acesso: 26/07/2015.

STEIN, S.; WYSS, M. **An introduction to seismology, earthquakes, and Earth**. USA: Blackwell Publishing Ltda., 2003.

SOTO, J. C. B. **Monitoramento das deformações da rede de referência do Sirgas em área com atividade tectônica**. Tese de Doutorado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006

STANAWAY, R.; ROBERTS, C. **Rigid plate transformation to support PPP and absolute positioning in Africa**. In: FIG Working Week. Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011. Disponível em http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2011/ppt/ts02a/ts02a_stanaway_roberts_4858_ppt.pdf. Acesso em:14/07/2013.

STANAWAY, R., ROBERTS, C. **A simplified parameter transformation model from ITRF2005 to any static geocentric datum**. In: International Global Navigation Satellite Systems Society IGPS Symposium 2009. Austrália, 2009. Disponível em <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/stanaway&roberts2009a.pdf>. Acesso em:14/07/2013.

TEIXEIRA, N. N.; FERREIRA, L. D. D. **Estabelecimento de redes geodésicas locais de alta precisão para o monitoramento de deformações da crosta: estudo de caso de uma barragem de usina hidrelétrica.** Boletim de Ciências Geodésicas. V.11, N°1. 2005. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/bcg/article/view/1545/1295>>. Acesso em 21/10/2015.

TEUNISSEN, P. J. G.; HUISMAN, L.; HU, C. **Real-time point positioning in NAD83: global and regional broadcast corrections compared.** Journal of Surveying Engineering, V.139, N°1. 2013. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29SU.1943-5428.0000089>>. Acesso em 21/10/2015.

THOMSON, D.B.; KRAKIWSKY, E.J.; STEEVES, R.R. **A manual for geodetic coordinate transformations in the maritime provinces.** Technical Report, n° 48 Department of Geodesy and Geomatics Engineering. University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada 1977.

TORGE, W. **Geodesy.** 3 ed. Berlin, New York: de Gruyter, 2001.

TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy.** 4 edition. de Gruyter. 529 p. 2012.

VASCONCELLOS, J.C.P. **Estudo de metodologia para vinculação e homogeneização de redes geodésicas GPS – implementação de um programa de ajustamento.** 195 f. Tese (Doutorado em engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

WESTON, N.; SOLER, T. **Rigorous Geodetic Positioning in the Americas.** In: 8th. FIG Regional Conference 2012. Montevideo, Uruguay, 26-29 November 2012. Disponível em < <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/Weston-SolerFIG-2012-Montevideo.pdf> >. Acesso em 30 de junho de 2014.

ZAMORA, J.M.; GUTIÉRREZ, S. B.; GUZMÁN, M. J. R.; GAMBOA, G. C. **Evaluación del comportamiento cinemático de una serie de estaciones del Sistema Geocéntrico para las Américas processadas com Precise Positioning em línea.** UNICIENCIA, v. 28, n°1. P. 2 – 19, 2014. Disponível em < <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/5589> >. Acesso em 22/10/2015.

ZEKI, O. Y.M. **Global Navigation satellite system contribution for observing the tectonic plate movements: status and perspectives.** Journal of Engineering. N.12. Vol. 20. pp.: 132-149. December- 2014. Disponível em: <http://www.iasj.net/iasj?func=search&query=kw:%22land%20movements%22> - Acesso:21/07/2015.