



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas
Câmpus de Presidente Prudente

Emerson Pereira Cavalheri

A faint background graphic featuring a globe in the center, surrounded by several overlapping, light-colored elliptical lines that suggest orbital paths or a complex geometric structure.

**Métrica para Definição de Pontos Estáveis
Utilizando-se da Análise de Robustez no
Posicionamento Por Ponto Preciso**

**Presidente Prudente
2015**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas
Câmpus de Presidente Prudente

Emerson Pereira Cavalheri

**Métrica para Definição de Pontos Estáveis
Utilizando-se da Análise de Robustez no
Posicionamento Por Ponto Preciso**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: **Prof. Dr. João Carlos Chaves**

Co-orientador: **Prof. Dr. Marcelo Carvalho dos Santos**

**Presidente Prudente
2015**

Cavalheri, Emerson Pereira

S— Métrica para Definição de Pontos Estáveis Utilizando-se da Análise de Robustez no Posicionamento Por Ponto Preciso/ Emerson Pereira Cavalheri- Presidente Prudente: [s.n.], 2015.

96 f.

Orientador: João Carlos Chaves

Co-orientador: Marcelo Carvalho dos Santos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Inclui Bibliografia.

1. Pontos Estáveis. 2. Análise de Robustez. 3. Posicionamento por Ponto Preciso. I. Cavalheri, Emerson Pereira. II. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título

*Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos
em especial aos meus pais Edmilson e Lindalva e à minha filha Isadora.*

Agradecimentos

Aqui devo agradecer a todos aqueles que de certa forma participaram e colaboraram desta fase em minha vida.

Primeiramente, devo um profundo agradecimento aos meus queridos pais Edmilson e Lindalva, os quais me deram o melhor ambiente desde criança para me desenvolver e, até os dias de hoje, ainda me amparam e apoiam em minhas decisões como adulto.

À minha filha Isadora, onde desde Setembro de 2008 mudou completamente a minha vida, sendo esta, o meu combustível incessante nas buscas dos meus sonhos. E também à sua mãe, Caroline, a qual sempre esteve acompanhando e cuidando do nosso bebê nos momentos em que não pude estar presente.

Ao meu orientar João Carlos Chaves, o qual me introduziu ao universo da pesquisa, e ao longo dos últimos 5 anos nos tornamos companheiros e amigos dividindo ensinamentos e conselhos os quais foram e serão preciosos para a pesquisa e vida.

Agradeço também às profundas discussões, as quais trouxeram grandes contribuições em um momento decisório de minha pesquisa, com o professor Marcelo Carvalho dos Santos, o qual se tornou meu co-orientador durante a minha breve estadia na University of New Brunswick no Canadá.

Agradeço à minha irmã Elizandra e primos Elielton e Rafael, os quais sempre estiveram juntos nas indagações e questionamentos sobre a vida, tendo uma enorme contribuição nos meus planos.

Aos meus amigos Pablo, Marcelo Benites, Matheus, Thales, Marcos, Tiago, Valdir, Felipe, Luis Gustavo, Lucas, Fábio, Leandro, Leonardo Ponzó e outros os quais ao longo dos anos nos tornamos um grupo de comemorações e discussões filósofo-científica-política-religiosa e outros, tendo certamente grandes contribuições em minhas decisões.

Aos meus colegas de Pós Graduação pelo companheirismo nos momentos difíceis.

Ao Departamento de Cartografia da UNESP, Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas e a todos os professores.

Ao IBGE pela disponibilização dos arquivos RINEX das estações.

Ao Carlos Alexandre pela ajuda com os processamentos no *software* GAPS e pela amizade.

E um agradecimento à CAPES pelo financiamento deste trabalho.

*'A sensação sem a razão é vazia
e a razão sem a sensação é cega'*

Immanuel Kant

Resumo

No monitoramento de deformações de grandes estruturas ou da superfície terrestre, o deslocamento dos pontos investigados geralmente são obtidos em função de pontos localizados fora do corpo de estudo e são considerados como estáveis (pontos de referência) nas análises. Se estes pontos, assumidos como referências, na realidade não forem estáveis, os parâmetros finais serão influenciados diretamente por esta consideração. Para estabelecer uma rede de referência pontos estáveis devem ser encontrados, ou seja, aqueles que menos se movimentam ao passar do tempo. A instabilidade, ou deslocamento, na posição de um ponto com relação ao tempo pode ser separados em dois tipos: continentais e locais. Os deslocamentos continentais tratam do movimento sofrido pela estação em função da sua velocidade continental, ou seja, devido ao movimento da placa em que se encontra. Já, os deslocamentos locais são obtidos em função de fenômenos físicos da geologia local, podendo ou não ter um padrão de variação. Os deslocamentos locais são os únicos de extremo interesse na definição de pontos estáveis. Assim, este trabalho propõe uma estratégia para classificação de pontos estáveis através da obtenção destes deslocamentos sem a influência dos deslocamentos continentais na posição da estação. Baseados em séries temporais de coordenadas obtidas por um método de soluções de processamentos PPP (*Precise Point Positioning*) com o *software* GAPS (GPS Analysis and Positioning Software), comparando-as com as coordenadas obtidas de um modelo de velocidades, por exemplo, o VEMOS2009 (*Velocity Model for South America and the Caribbean*), pretende-se definir uma métrica para classificação de pontos estáveis, onde a *Análise de Robustez de redes* é adotada como critério estatístico de avaliação do modelo matemático proposto. Este trabalho, trata-se de um novo ponto de vista ainda não testado nas pesquisas científicas sobre *Análises de Robustez*. Com este estudo, pretende-se propor procedimentos metodológicos que possibilite o estabelecimento de redes de referência para trabalhos geodésicos de alta acurácia.

Palavras-chave: Pontos Estáveis, Análise de Robustez, Posicionamento por Ponto Preciso.

Abstract

Deformation monitoring of large structures or land surface, the displacement of the investigated points are usually obtained according to points located outside of the studied body and they are considered to be stable (reference points) in the analysis. If these constrained points, assumed as references, in reality are not stable the final parameters will be directly influenced by this consideration. To establish a reference network stable points must be found, i.e, those that least move over time. The instability or displacements in the point position with respect to time can be separated into two types: continental and local. The continental displacements treat the suffered motion by the station on the basis of the continental speed, that is, due to the plate movement that the point is locate. The local displacements are obtained as function of physical phenomena of the local geology, they may or may not have a pattern of variation. Local movements are the only of extreme interest in the definition of stable points. Thus, this work proposes a strategy for classification of stable points by using these obtained displacements without the influence of continental displacements in the station position. Based on coordinate time series obtained from the PPP (Precise Point Positioning) processing method with the GAPS (GPS Analysis and Positioning Software) software, comparing them to coordinates obtained from a velocity model, e.g., the VEMOS2009 (Velocity Model for South America and the Caribbean), is intended to define a metric for classification of stable points, where the Network Robustness Analysis is adopted as a statistical criterion for evaluation of the proposed mathematical model. This work is a new point of view still not tested in scientific research of Robustness Analysis. With this study, is intended to propose methodological procedures that will enable the establishment of reference networks for geodetic work with high accuracy.

Keywords: Stable points, Robustness Analysis, Precise Point Positioning.

Lista de Figuras

3.1	Distribuição das placas.	26
3.2	Correntes de convecção. a) Correntes de convecção na astenosfera. b) Correntes de convecção em todo o manto	27
3.3	Outros fatores que movimentam as placas	28
3.4	Placa B se movendo no sentido anti-horário com relação à A. O movimento é definido pela velocidade angular ω no pólo de rotação P. Linhas duplas são segmentos rígidos e as setas indicam a direção do movimento nas falhas transformantes	29
3.5	Geometria para determinação da velocidade relativa no ponto A no limite entre duas placas em termos da taxa de rotação ω sobre o polo P	29
3.6	Geometria para determinação da velocidade relativa no ponto A no limite entre duas placas em termos da taxa de rotação ω sobre o polo P	30
3.7	Vetores de Euler para pares de placas vizinhas conforme modelo NUVEL-1 de DeMets et al. (1990) e o modelo NUVEL-1A de DeMets et al. (1994) 31	31
5.1	Fluxograma de execução do projeto.	45
5.2	Distribuição dos pontos.	47
5.3	Modelo de velocidades VEMOS2009.	51
5.4	Ordem dos parâmetros.	52
5.5	Descrição dos parâmetros.	53
5.6	Movimentos continentais e locais.	55
5.7	Ilustração da série temporal pelo PPP.	56
5.8	Ilustração da série temporal pelo modelo.	57
5.9	Comparação das séries temporais pelo PPP e modelo.	58
6.1	Comparação PPP com o modelo para a estação BRAZ.	64
6.2	Comparação PPP com o modelo para a estação FORT.	65
6.3	Comparação PPP com o modelo para a estação BRFT.	66
6.4	Comparação PPP com o modelo para a estação MANA.	67
6.5	Comparação PPP com o modelo para a estação NAUS.	68
6.6	Comparação PPP com o modelo para a estação IMPZ.	69

6.7	Comparação PPP com o modelo para a estação CHPI.	71
6.8	Comparação PPP com o modelo para a estação IMBT.	72
6.9	Comparação PPP com o modelo para a estação RECF.	73
6.10	Comparação PPP com o modelo para a estação CUIB.	74
6.11	Parte do relatório de ajuste.	76
6.12	Arquivo de saída para as análises de confiabilidades e geométrica de deformações.	77
6.13	Arquivo de saída para a análise de robustez.	78
6.14	Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - BRAZ	79
6.15	Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - FORT/BRFT	80
6.16	Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - MANA/NAUS	81
6.17	Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - IMPZ	82
6.18	Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - CHPI	83
6.19	Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - IMBT	84
6.20	Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - RECF	85
6.21	Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - CUIB	86

Lista de Tabelas

4.1	Intervalos de controlabilidade	35
4.2	Parâmetros de não-centralidade	35
4.3	Níveis de probabilidade da elipse	44
5.1	Disponibilidade dos dados	48
5.2	Dados de entrada para o VEMOS2009	50
6.1	Processamento dos dados	61
6.2	Solução SIRGAS2000, época 2000,4	62
6.3	Velocidades interpoladas do VEMOS2009 (ITRF2005)	63
6.4	Deslocamentos e velocidades das estações.	75
6.5	Análise de Robustez estação BRAZ	79
6.6	Análise de Robustez estação FORT/BRFT	80
6.7	Análise de Robustez estação MANA/NAUS	81
6.8	Análise de Robustez estação IMPZ	82
6.9	Análise de Robustez estação CHPI	83
6.10	Análise de Robustez estação IMBT	84
6.11	Análise de Robustez estação RECF	85
6.12	Análise de Robustez estação CUIB	86
6.13	Classificação dos pontos estáveis.	87
6.14	Antenas utilizadas	88
6.15	Análise de Robustez estação BRAZ	89
6.16	Análise de Robustez estação FORT/BRFT	89
6.17	Análise de Robustez estação MANA/NAUS	90
6.18	Análise de Robustez estação IMPZ	90
6.19	Análise de Robustez estação RECF	90
6.20	Análise de Robustez estação CUIB	91
6.21	Classificação dos pontos estáveis.	91

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Considerações iniciais	17
1.2	Objetivos	19
1.3	Justificativa	19
1.4	Organização dos capítulos	19
2	Posicionamento por satélite	21
2.1	Introdução	21
2.2	Posicionamento por ponto preciso	21
3	Movimentos das placas litosféricas	25
3.1	Introdução	25
3.2	Tectônica de placas	25
3.3	Características do movimento de placas	27
3.4	Modelos de placas	30
4	Análise de robustez	33
4.1	Introdução	33
4.2	Análises de confiabilidades	33
4.2.1	Confiabilidade interna	34
4.2.2	Escolha dos níveis de significância e poder de teste	36
4.2.3	Confiabilidade externa	36
4.3	Análise geométrica de deformação	37
4.4	Robustez de rede 3D	40
4.5	Limiares	43
5	Materiais e métodos	45
5.1	Introdução	45
5.2	Materiais	46
5.3	Metodologia	52
5.3.1	Processamento dos dados no <i>software</i> GAPS	52
5.3.2	Séries temporais obtidas do modelo de velocidades	54
5.3.3	Métrica para definição de pontos estáveis	55

5.3.4	Adaptação da análise de robustez nos resultados PPP e modelo	58
5.3.5	Classificação de pontos estáveis	59
6	Resultados e análises	61
6.1	Resultados parciais dos processamento	61
6.2	Séries temporais PPP e modelo VEMOS2009	62
6.3	Análise de robustez	76
6.4	Análises e definição dos pontos estáveis	78
6.5	Análises após a substituição das antenas	89
7	Considerações finais e futuras contribuições	93
	Referências	95

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

No contexto de análises de deformações, seja de uma obra de engenharia ou da superfície terrestre, determinar o real movimento do objeto de estudo sem influências externas tem sido um grande desafio para a comunidade científica. As primeiras aplicações desta natureza, utilizando GPS (*Global Positioning System*), foram nas medições de movimentos relativos entre placas tectônicas e deformações de regiões sismicamente ativas [1]. Para analisar esta movimentação, obtém-se o deslocamento destes pontos, comparando-se as coordenadas dos respectivos pontos entre duas épocas, com base em pontos fora da área de movimentação, denominados como pontos de referência. Segundo [2], no monitoramento geodésico de deformações, normalmente, há dois tipos de redes, a de referência, onde se encontram os pontos (de referência) fora da área de movimentação, e a relativa, onde se localizam os pontos (objeto) de interesse. Um dos problemas no processo de análise de deformação é a identificação de pontos de referência estáveis. Alguns fatores podem contribuir para que um ponto não seja estável, porém a geologia local seria um dos principais elementos. A identificação de pontos estáveis na análise de deformações é de extrema importância, uma vez que os parâmetros de interesses estarão influenciados diretamente por estes pontos. Obtida a rede de referência estável, a determinação do estado geométrico de deformação da região analisada se torna relativamente simples [2].

Desde a concepção do posicionamento por satélites, vários métodos foram desenvolvidos. Pode-se citar o método mais simples, quando é realizado o posicionamento de apenas um receptor, até o posicionamento de vários receptores, ou seja, uma rede, onde as posições são obtidas com relação a outros receptores. Nas atividades práticas de engenharia, o posicionamento mais comumente utilizado é o relativo, pois, dependendo da geometria e da instrumentação, além de proporcionar posições acuradas, é possível eliminar ou minimizar as fontes mais significantes de erros envolvidas no posicionamento por satélite, como por exemplo os efeitos atmosféricos e os erros nos relógios dos receptores e dos satélites. Algumas das desvantagens do posicionamento relativo são a imposição de injunções feitas nas estações de referência [3], a estrutura bem como o seu custo. Outro método alternativo, posicionamento absoluto, baseia-se

na utilização de um receptor e nas informações precisas de efemérides e correções dos relógios dos satélites. Nesta concepção, todos os erros que influenciam o posicionamento GPS devem ser modelados. Este método permite, após coletar as observações, estimar as coordenadas do único receptor e outros parâmetros como os erros dos relógios e os efeitos atmosféricos [4]. Assim, utilizando-se do PPP, tem-se uma posição referenciada somente ao sistema de coordenadas adotado pelas órbitas precisas, ou seja, uma posição sem influência de outras estações.

Os deslocamentos na posição de um ponto com relação ao tempo podem ser separados em dois tipos: continentais e locais. Os deslocamentos continentais tratam do movimento sofrido pela estação em função da sua velocidade continental, ou seja, devido ao movimento da placa em que se encontra. A percepção deste movimento pode ser interpretada como uma tendência na série temporal com pequena variação por ano. Já, os deslocamentos locais são obtidos em função de fenômenos naturais locais, podendo ou não ter um padrão de variação. Os deslocamentos locais são os únicos de extremo interesse na definição de pontos estáveis. Uma estratégia para a obtenção destes deslocamentos seria retirar a influência dos deslocamentos continentais na posição da estação, utilizando-se de um modelo de velocidades ou de placa que melhor represente a área de investigação. Posteriormente, utilizar um rigoroso critério estatístico para a classificação dos pontos estáveis.

Na maioria dos países, as redes geodésicas são analisadas com base em testes estatísticos, verificando os erros grosseiros nas observações, os valores das variâncias a posteriores, as elipses de erros e as estimativas dos resíduos [5]. O problema relacionado com o uso destes testes ocorre quando observações com erros grosseiros não são detectadas. Isto proporcionou ao geodesta holandês Baarda, em 1968, publicar a teoria sobre confiabilidades, na qual descreve como uma rede geodésica reage a pequenas influências nas observações. Porém, [6] sugerem que as análises adicionais à confiabilidade melhorariam a interpretação das quantidades e estes também seriam independentes das injunções de datum. Assim, os resultados das análises de confiabilidade, utiliza a análise geométrica de rigidez, a qual se baseia em tensores de deformação. Esta análise representa a deformação de uma rede geodésica, quando erros grosseiros não detectados estiverem presentes nas observações. A análise é realizada de um ponto de vista puramente geométrico e é independente das injunções de datum. Comparando os resultados da fusão das análises com limiares baseados na acurácia dos pontos, surge uma nova técnica, denominada de *análise de robustez de redes*. Tendo como principais características a não dependência de datum e refletindo somente na geometria da rede e acurácia das observações.

Assim, com base nas séries temporais de coordenadas obtidas por soluções de processamentos PPP com o software GAPS (GPS Analysis and Positioning Software), comparando-as com as coordenadas obtidas de um modelo de velocidades, por exemplo, o VEMOS2009 (*Velocity Model for South America and the Caribbean*), pretende-se

definir uma métrica para classificação de pontos estáveis, onde a análise de robustez é adotada como critério estatístico de classificação. Com este estudo, pretende-se propor procedimentos metodológicos que possibilitem o estabelecimento de redes de referência para trabalhos geodésicos de alta acurácia.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem por objetivos propor uma métrica para identificação de pontos estáveis com intuito de obter redes de referência de alta acurácia, apoiando futuros levantamentos e atividades de engenharia em geral no território brasileiro. Tal proposta se faz com base na adaptação da análise de robustez de redes em soluções do PPP e modelo de velocidades.

1.3 Justificativa

A identificação de pontos estáveis no contexto do posicionamento global de objetos na superfície terrestre requer pontos bases para que se obtenham posições confiáveis em função destes. Esta metodologia auxiliará não somente na identificação de pontos estáveis bem como em na identificação de erros sistemáticos em qualquer modelagem matemática. Assim, com este estudo, pretende-se propor procedimentos metodológicos que possibilite o estabelecimento de redes de referência para trabalhos geodésicos de alta acurácia.

1.4 Organização dos capítulos

Este trabalho está organizado em sete capítulos. No primeiro, tem-se uma introdução do assunto nas considerações iniciais, os objetivos, justificativa e a organização do trabalho. Nos capítulos dois, três e quatro seguem a revisão da teoria, respectivamente, na seguinte ordem: posicionamento por satélite; movimento das placas litosféricas e a análise de robustez. No quinto capítulo, os materiais utilizados e uma explanação da metodologia proposta. No capítulo seguinte, o sexto, apresentam-se os resultados e as análises. E por fim, as considerações finais e futuras contribuições.

2 Posicionamento por satélite

2.1 Introdução

O método de posicionamento por satélites artificiais se utiliza de medidas de diferenças de sinais de rádio, ou ondas eletromagnéticas, com o propósito de determinar coordenadas de um observador. Para obter coordenadas neste tipo de posicionamento, requer-se que as órbitas dos satélites sejam conhecidas [5].

Os principais sistemas de posicionamento por satélites existentes são: o Norte Americano *Global Positioning System* (GPS), o Russo *GLobal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistem* (GLONASS), o GALILEO da União Européia e o Chinês BEIDOU/COMPASS.

Nesta dissertação, nos processamentos das observáveis, foi utilizado o método de posicionamento por Ponto Preciso e foram utilizados somente as observáveis da constelação GPS. Assim, na seção seguinte aborda-se as o método PPP de posicionamento com as observáveis GPS.

2.2 Posicionamento por ponto preciso

No contexto do posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*), o método mais comumente utilizado é o relativo. A posição de um receptor é obtida com relação a outro, o qual ocupa uma estação de coordenadas conhecidas. Nesta configuração, os dois receptores devem observar os mesmos satélites, simultaneamente. Dependendo da geometria e instrumentação, além de proporcionar posições acuradas, é possível eliminar ou minimizar as fontes mais significantes de erros envolvidas no posicionamento por satélite. Porém, a desvantagem do posicionamento relativo é a imposição de injunções nas estações de referência [3]. Uma alternativa para este problema, porém, utilizando apenas um receptor e de informações precisas de efemérides e relógios dos satélites, seria o *Posicionamento por Ponto Preciso*. Este método permite que um receptor, após coletar as observações, estime suas coordenadas, bem como outros parâmetros como os erros no relógio do receptor e o atraso total da atmosfera neutra [4].

O PPP requer fundamentalmente o uso das efemérides e correções dos relógios dos satélites obtidos pelo IGS, ambos com alta acurácia. No que diz respeito às observáveis envolvidas no PPP, é comum que se utilizem dados de receptores de dupla frequência, possibilitando obter a observável íon-free, tanto para a fase (2.1) quanto para a pseudodistância (2.2). Esta observável resulta de uma combinação linear entre as frequências L1 e L2 do GPS, e relacionam-se com a posição do usuário, relógios, troposfera e parâmetros de ambiguidade. Conforme o modelo simplificado das observações íon-free na pseudodistância e fase, tem-se respectivamente [3]:

$$PD = \rho + c(dT - dt) + T_r + \varepsilon_P \quad (2.1)$$

$$\Phi = \rho + c(dT - dt) + T_r + N\lambda + \varepsilon_\Phi \quad (2.2)$$

Nestas equações, têm-se:

- PD : é a combinação íon-free para a pseudodistância;
- Φ : é a combinação íon-free para a fase;
- ρ : é a distância geométrica entre antena do receptor, no instante de recepção do sinal, e do satélite, no instante de transmissão;
- c : é a velocidade da luz no vácuo;
- dT : é o erro do relógio do receptor;
- dt : é o erro do relógio do satélite;
- T_r : é o atraso no caminho do sinal devido à atmosfera neutra (Troposfera);
- N : valor não inteiro da ambiguidade da combinação íon-free de fase;
- λ_1, λ_Φ : são as fases das ondas portadoras L_1 e L_2 , em comprimentos de onda, respectivamente;
- $\varepsilon_P, \varepsilon_\Phi$: são as componentes dos ruídos consideráveis nas componentes medidas, incluindo o multicaminho.

A distância geométrica (ρ) contém a posição do satélite (X_s, Y_s, Z_s) na época de transmissão (t) e a posição do receptor (X, Y, Z) na época de recepção ($T = t + \rho/c$), equação 2.3.

$$\rho = \sqrt{(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2} \quad (2.3)$$

A utilização dos produtos precisos do IGS, órbitas e relógios, faz com que o relógio dos satélites (dt) nas equações (2.1) e (2.2) seja fixo, desta forma são retirados da equação [3].

O atraso troposférico (T_r) pode ser decomposto como produto do atraso no zênite (zpd) e uma função de mapeamento (M), a qual relaciona o atraso inclinado ao zpd , formando-se assim funções matemáticas para o posicionamento de um ponto para as observações pseudodistância e fase, respectivamente:

$$f_P = \rho + cdT + Mzpd + \varepsilon_{PD} - PD = 0 \quad (2.4)$$

$$f_\Phi = \rho + cdT + Mzpd + N\lambda + \varepsilon_\Phi - \Phi = 0 \quad (2.5)$$

O atraso troposférico ($Mzpd$) é separado em duas componentes, uma com comportamento bem conhecido, chamada de componente hidrostática ($M_h zpd_h$) e outra componente de dimensão bem menor chamada componente úmida ($M_w zpd_w$). O atraso zenital hidrostático zpd_h pode ser modelado e considerado conhecido, já zpd_w deve ser estimado. Para soluções precisas, variações temporárias em zpd_h , M_h e M_w devem ser baseadas em modelos globais sazonais (BOEHM et al., 2006¹; BOEHM et al., 2007² apud [3]), modelos de previsão numérica de tempo (BOEHM AND SCHUH, 2004³; KOOUBA, 2007⁴ apud [3]).

Embora nem todos os erros envolvidos nas observáveis GNSS tenham sido introduzidos nas equações (2.1) e (2.2), todos devem ser tratados com cuidado, se o objetivo é obter alta acurácia. Correções devem ser aplicadas nas observáveis pseudodistância e fase para eliminar efeitos tais como a relatividade geral, erros advindos dos relógios dos satélites, atrasos atmosféricos, e etc. Alguns termos que devem ser considerados no PPP são: correções dos centro de fase da antena no satélite e do receptor (PO e PCV), fase wind-up, marés terrestres, carga dos oceanos, parâmetros de rotação da Terra, entre outros [3].

¹Boehm J, Niell A, Tregoning, P, Schuh H (2006) Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.* 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546

²Boehm J, Heinkelmann R, and Schuh H (2007) Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications, *Journal of Geodesy*, doi:10.1007/s00190-007-0135-3

³Boehm J, Schuh H (2004) Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.* 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984

⁴Kouba J (2007) Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1), *Journal of Geodesy*, doi:10.1007/s00190-007-0170-3

3 Movimentos das placas litosféricas

3.1 Introdução

A Terra está em constante movimento sendo estes de diferentes tipos. Como planeta, a Terra está rotacionando em volta do baricentro do sistema solar, no qual sua órbita é influenciada pela gravidade de outros corpos da nossa galáxia, tais como: Sol, Lua e outros planetas [10]. Por outro lado, a Terra está rotacionando em volta do seu centro de massa. Esta rotação não uniforme, sendo perturbada pela interação da mesma com o manto em seu interior, a crosta terrestre, oceanos e atmosfera. Segundo [10], as perturbações na rotação da Terra são classificadas em precessão, nutação, movimento do pólo e variações de comprimento do dia (*length of day* - (lod)).

Além destes movimentos, processos geofísicos ocorrendo no interior da Terra induzem o movimento global das placas e as deformações regionais e locais da crosta. Do ponto de vista da geodinâmica, a rotação da Terra e o movimento de placas são os dois maiores fenômenos geofísicos os quais se relacionam entre si [10].

Nas seções seguintes, segue uma descrição geral sobre a tectônica de placas, os movimentos de placas bem como os modelos de placas utilizados.

3.2 Tectônica de placas

O movimento de placas é um modelo no qual a camada externa da Terra é dividida em um número de finas e rígidas placas, as quais estão em movimento, umas em relação às outras [11].

Morgan (1968¹ apud [10]) introduziu o conceito de tectônica de placas, onde a superfície da Terra é composta por um mosaico de placas litosféricas, fronteiras divergentes de placas, fronteiras convergentes de placas, falhas transformantes e zonas de compressão intra-continentais.

A deriva dos continentes é um movimento relativo entre os continentes sobre a superfície terrestre, resultado do espalhamento do assoalho oceânico, causado pela

¹Morgan, W. J., Rises, trenches, great faults, and crustal blocks, J. Geophys. Res., 73, 1959-1982, 1968.

convenção do manto, que se transforma em movimento das placas [10].

As velocidades entre as placas são da ordem de poucas dezenas de milímetros por ano. Grande parte dos terremotos, erupções vulcânicas e formações de montanhas ocorrem nas fronteiras das placas [11]. Segue uma distribuição das principais placas na Figura 3.1.

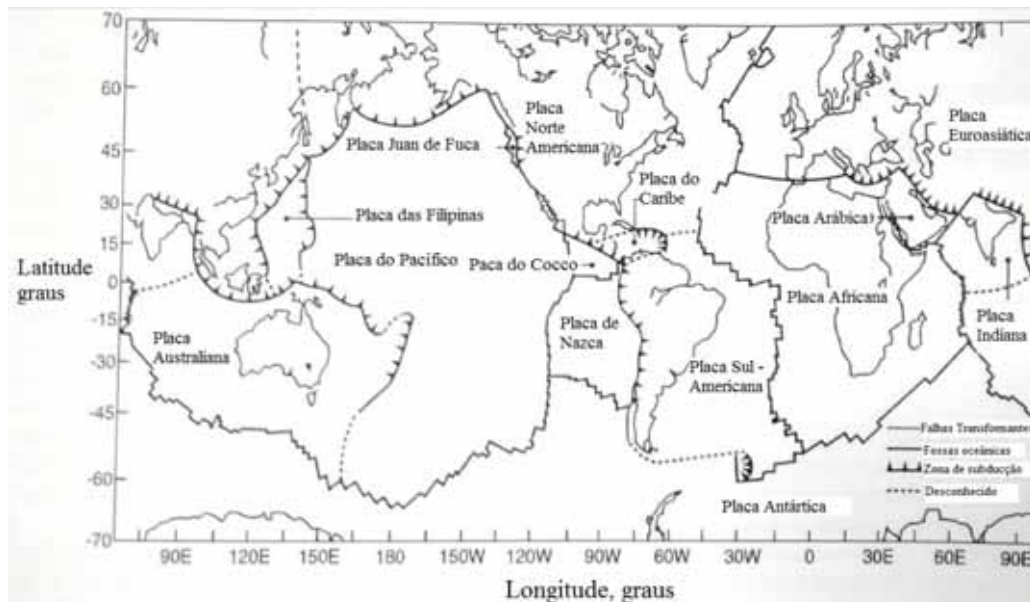


Figura 3.1: Distribuição das placas.

Fonte: [11]

Existem sete placas mais importantes: as placas Euroasiática, Antártica, Norte-Americana, Sul-Americana, Pacífica, Africana e Australiana. De acordo com [10], as placas podem diminuir ou crescer de tamanho dependendo se tiverem fronteiras de convergência ou divergência de placas.

A expansão do assoalho oceânico foi primeiramente proposto por Harry Hess, em 1962, da Universidade de Princeton (EUA). Baseado em dados geológicos e geofísicos, Hess propôs que o fundo dos oceanos estariam relacionado a processos de convecção do manto. Este é o processo, no qual materiais ascendem do manto devido as altas temperaturas e são emanados pelas dorsais meso-oceânicas onde há uma separação do oceano e conseqüentemente criação da litosfera [12]. Já nas zonas de subducção, aconteceria a destruição da crosta oceânica, que são locais onde a crosta oceânica mais densa mergulharia para o interior até atingir condições para se transformar em manto [12].

A convecção do manto refere-se a um movimento muito lento de rochas, na qual o material plástico-viscoso se move lentamente para cima. Pelo contrário, o material mais frio e denso desce, formando assim a convecção do manto, conforme Figura 3.2 [12].

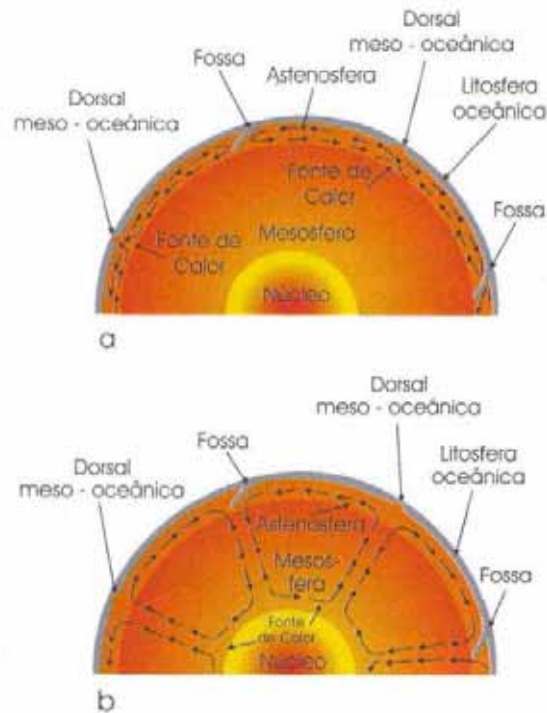


Figura 3.2: Correntes de convecção. a) Correntes de convecção na astenosfera. b) Correntes de convecção em todo o manto

. Fonte: [12]

3.3 Características do movimento de placas

A principal teoria para explicar o movimento de placas era a Teoria da Deriva Continental, em que seu criador, Wegener, não sabia explicar as forças que moviam os continentes. Porém, atualmente, sabe-se que a litosfera possui uma energia cinética cuja fonte é o fluxo térmico interno da Terra, onde o manto chega à superfície através das correntes de convecção [12].

O movimento de convecção das massas do manto, cuja viscosidade é 10^{18} vezes maior que a água, ocorre lentamente, da ordem de centímetros por ano [12]. Cientistas acreditam que as correntes não são suficientes para movimentar os continentes, mas que juntamente com outros fenômenos, tais como o processo de subducção, poderiam produzir esta movimentação. Segundo [12], outros fatores que contribuem para a movimentação das placas são listados e visualizados na Figura 3.3:

- Pressão criada pela geração de nova litosfera oceânica na dorsal meso-oceânica;
- Mergulho da litosfera para o interior do manto, puxado pela crosta oceânica mais densa; e
- Espessamento da placa litosférica à medida que se afasta da dorsal meso-oceânica onde foi criada. Desta forma, o limite entre a litosfera e astenosfera se torna uma

superfície inclinada.

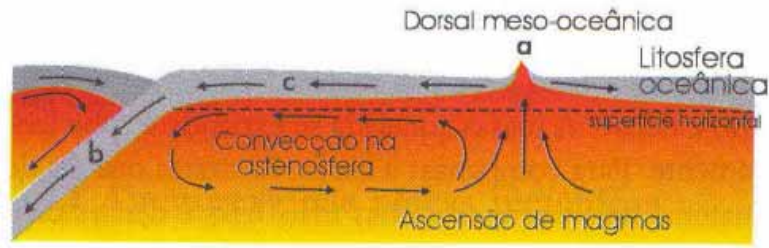


Figura 3.3: Outros fatores que movimentam as placas [12]

O movimento relativo entre duas placas podem ser descrito utilizando o Teorema de Euler [11]. O teorema diz que qualquer linha na superfície de uma esfera pode ser transladado para qualquer outra posição e orientação por uma simples rotação em dado eixo passando no centro da esfera. Segundo [11], em termos da superfície terrestre significa que a superfície de uma placa rígida pode ser deslocada para uma nova posição por uma rotação de um eixo definido de forma única.

O ponto em que o eixo intercepta a superfície da Terra é conhecido como polo de rotação. A Figura 3.4 ilustra o polo de rotação (P) de uma placa, onde a placa B está rotacionando no sentido anti-horário com relação à placa A , com um ângulo de rotação ω sobre o polo de rotação P . Segmentos rígidos encontram-se em linhas de longitude partindo do polo de rotação. Falhas encontram-se como pequenos círculos com centros no polo de rotação [11].

O movimento relativo entre duas placas adjacentes é completamente especificado quando a latitude e longitude do polo de rotação, juntamente com a velocidade angular de rotação ω são dadas.

A localização do polo de rotação pode ser determinada pela orientação dos cumes das cordilheiras, perfis magnéticos e falhas transformantes.

A magnitude da velocidade relativa, u_{rel} , entre as placas, em qualquer fronteira, é dada pela equação 3.1.

$$u_{rel} = \omega a \sin \Delta \quad (3.1)$$

onde:

a : raio da Terra; e

Δ : ângulo subtendido pelo polo de rotação P e o ponto A , no limite da placa (Figura 3.5).

O ângulo Δ está relacionado com a colatitude Θ e a longitude a leste Ψ do polo de rotação e da colatitude Θ' e longitude a leste Ψ' do ponto no limite da placa A , equação 3.2.

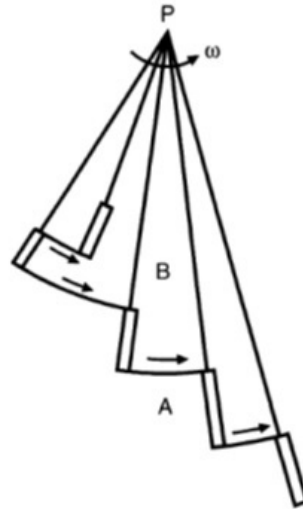


Figura 3.4: Placa B se movendo no sentido anti-horário com relação à A. O movimento é definido pela velocidade angular ω no pólo de rotação P. Linhas duplas são segmentos rígidos e as setas indicam a direção do movimento nas falhas transformantes

Fonte:[11]

$$\cos\Delta = \cos\Theta\cos\Theta' + \sin\Theta\sin\Theta'\cos(\Psi - \Psi') \quad (3.2)$$

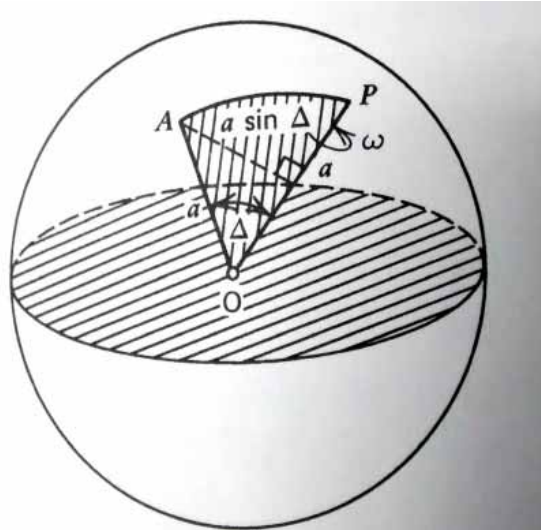


Figura 3.5: Geometria para determinação da velocidade relativa no ponto A no limite entre duas placas em termos da taxa de rotação ω sobre o pólo P

Fonte:[11]

A geometria ilustrada na Figura 3.6, onde s é o arco de superfície entre os pontos A e P, e O é o centro de massa da Terra. Com as equações 3.1 e 3.2, determinam a magnitude da velocidade relativa entre duas placas em qualquer ponto no limite entre duas placas, uma vez que a latitude e longitude do ponto no limite foram especificadas.

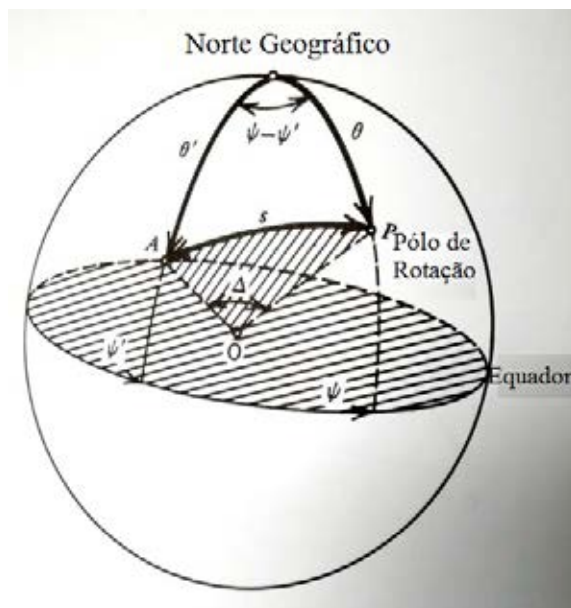


Figura 3.6: Geometria para determinação da velocidade relativa no ponto A no limite entre duas placas em termos da taxa de rotação ω sobre o polo P

Fonte:[11]

3.4 Modelos de placas

Na seção anterior, descreveu-se o movimento das placas, bem como sua geometria. Como estas placas se encontram em constante movimento, modelar estes movimentos é de extrema importância para prospecções futuras.

Assim, alguns modelos de placas foram propostos após entender a dinâmica das placas. Os primeiros modelos surgiram baseados apenas em observações geofísicas. Por exemplo, os modelos NUVEL-1 e NUVEL-1A, os quais descreviam o movimento de 12 placas rígidas. O modelo para os vetores de rotação das placas do NUVEL foi obtido utilizando dados de 1122 pontos localizados nos limites de 22 placas. Os dados incluem a cobertura de 277 determinações baseadas nas anomalias magnéticas. O modelo NUVEL também utiliza 232 azimutes transformados das falhas e 724 vetores de deslocamentos devido a terremotos. Segue, na Figura 3.7, uma tabela contendo as latitudes e longitudes do polos de rotação dos movimentos relativos entre dez placas [11].

Plate Pair	Latitude (°N)	Longitude (°E)	ω , NUVEL-1 (deg Myr ⁻¹)	ω , NUVEL-1A (deg Myr ⁻¹)
EU-NA	62.4	135.8	0.22	0.21
AF-NA	78.8	38.3	0.25	0.24
AF-EU	21.0	-20.6	0.13	0.12
NA-SA	16.3	-58.1	0.15	0.15
AF-SA	62.5	-39.4	0.32	0.31
AN-SA	86.4	-40.7	0.27	0.26
NA-CA	-74.3	-26.1	0.11	0.10
CA-SA	50.0	-65.3	0.19	0.18
NA-PA	48.7	-78.2	0.78	0.75
CO-PA	36.8	-108.6	2.09	2.00
CO-NA	27.9	-120.7	1.42	1.36
CO-NZ	4.8	-124.3	0.95	0.91
NZ-PA	55.6	-90.1	1.42	1.36
NZ-AN	40.5	-95.9	0.54	0.52
NZ-SA	56.0	-94.0	0.76	0.72
AN-PA	64.3	-84.0	0.91	0.87
PA-AU	-60.1	-178.3	1.12	1.07
EU-PA	61.1	-85.8	0.90	0.86
CO-CA	24.1	-119.4	1.37	1.31
NZ-CA	56.2	-104.6	0.58	0.55
AU-AN	13.2	38.2	0.68	0.65
AF-AN	5.6	-39.2	0.13	0.13
AU-AF	12.4	49.8	0.66	0.63
AU-IN	-5.6	77.1	0.31	0.30
IN-AF	23.6	28.5	0.43	0.41
AR-AF	24.1	24.0	0.42	0.40
IN-EU	24.4	17.7	0.53	0.51
AR-EU	24.6	13.7	0.52	0.50
AU-EU	15.1	40.5	0.72	0.69
IN-AR	3.0	91.5	0.03	0.03

Figura 3.7: Vetores de Euler para pares de placas vizinhas conforme modelo NUVEL-1 de DeMets et al. (1990) e o modelo NUVEL-1A de DeMets et al. (1994)

Fonte:[11]

As considerações dos modelos implicam que as placas são rígidas. Esta é uma aproximação coerente para qualquer instante no tempo, mas como as placas se expandem com o passar do tempo, deformações devem ser consideradas no interior das placas (DEWEY, 1975²; GORDON, 1998³ apud [11]).

Assim, a tecnologia de monitoramento por satélites agregou mais informações para determinar o movimento das placas. Com estações de monitoramento espalhadas pelas placas, esta técnica processa as informações obtidas dos satélites e calcula as coordenadas desta estação no tempo. Com as coordenadas de várias estações distribuídas pelas placas, se torna possível determinar os parâmetros e velocidades das placas de forma mais precisa.

Portanto, outra alternativa é utilizar de modelos geodésicos de placas. Em [13], apresenta-se tal modelagem, a qual, utilizando-se de estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), estimou-se o campo de velocidade, bem como os

²DEWEY, J. F. (1975). "Finite plate evolution: some implications for the evolution of rock masses at plate margins". American Journal of Science 275-A: 260-284

³GORDON, R. G. "The plate tectonic approximation: Plate nonrigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions." Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 26 (1998): 615-642

parâmetros da placa Sul-Americana.

4 Análise de robustez

4.1 Introdução

A técnica de robustez analisará, com base nos *erros máximos não detectáveis*, se a rede é “robusta” ou não. A rede será “robusta” se a influência destes erros for pequena, caso contrário é “fraca”, ou seja, não “robusta”. Esta análise se faz com a fusão de duas técnicas, a técnica de confiabilidade e de análise geométrica de deformações. A primeira técnica, de confiabilidade, fornecerá o erro máximo não detectável, e a análise geométrica de deformação, encontrará a deformação da rede com base nesse erro, ou seja, o quanto a rede estará deformando com base nos erros máximos não detectados. Esta medida se isenta das injunções do ajustamento, refletindo somente a geometria da rede e as acurácias das observações.

4.2 Análises de confiabilidades

Desde que [14] propôs a técnica de confiabilidade, alguns seguidores ainda utilizam e melhoram essa técnica, pois a mesma trata-se de uma rigorosa análise estatística, na qual permite avaliar e validar os vários tipos de redes. A qualidade das redes geodésicas é analisada por testes, após o ajustamento. Se existem erros grosseiros nas observações, o Teste Global do Modelo (TGM), que se baseia em verificar as variâncias a priori e a posteriori, detectará. Sabendo que as observações estão eivadas de erros, o teste *data-snooping* indicará em quais observações ocorrem esses erros. Assim que localizadas, as observações, geralmente, são retiradas do modelo e as equações ajustadas novamente. De posse dessas informações, a teoria da confiabilidade quantificará os erros presentes nas observações e a sua influência na estimação das coordenadas.

A medida de confiabilidade é dividida em confiabilidade interna e confiabilidade externa. O primeiro tipo de confiabilidade quantifica o menor erro existente na observação que pode ser localizado com certa probabilidade, enquanto o segundo, quantifica a influência dessas observações no cálculo das coordenadas dos pontos.

4.2.1 Confiabilidade interna

A confiabilidade interna trata-se de uma medida do menor erro existente em uma observação. A ideia é investigar as implicações da aceitação da hipótese nula, no TGM, que postula a não existência de erro grosseiro na observação. E como consequência, cometer o erro tipo II, que seria aceitar a hipótese nula quando ela não é verdadeira. Por meio desta teoria, em [6], estima-se este valor mínimo de um erro grosseiro na observação que pode ser detectado. Este valor mínimo, $(\nabla_0 l_i)$, que pode ser localizado com níveis de probabilidade α_0 e β_0 é dado por:

$$\nabla_0 l_i = \sigma \frac{\lambda_0}{\sqrt{(r_i)}}, (i = 1, \dots, n) \quad (4.1)$$

onde: λ_0 : parâmetro de não-centralidade;

σ : desvio padrão da i -ésima observação;

r_i : redundância parcial.

Na equação 4.1, o número de redundância r_i fornece um conhecimento sobre a controlabilidade das observações. Essa quantidade pode variar de 0 a 1, estando próximo de 0, indica a existência de erros significativos nas observações, caso contrário, se próximo de 1, as observações foram suficientemente testadas.

As redundâncias parciais são obtidas com base na matriz descrita pela seguinte expressão [15]:

$$R = \frac{1}{\hat{\sigma}_0^2} \Sigma_V P \quad (4.2)$$

onde:

$\hat{\sigma}_0^2$: fator de variância a posteriori;

Σ_V : matriz covariância dos resíduos;

P : matriz dos pesos.

A Tabela 4.1 contém os intervalos recomendados para orientação da controlabilidade das observações em função da redundância.

Tabela 4.1: Intervalos de controlabilidade

Intervalo	Controlabilidade
$0 < r_i < 0,01$	Não Há
$0,01 < r_i < 0,1$	Ruim
$0,1 < r_i < 0,3$	Suficiente
$0,3 < r_i < 1$	Boa

Fonte: Murle; Bill (1984)¹ apud [15]

O parâmetro de não-centralidade λ_0 é calculado com base nos níveis de probabilidade α_0 e β_0 , em uma distribuição normal reduzida, 4.3.

$$\lambda_0 = Z_{\frac{\alpha_0}{2}} - \theta_{\beta_0}^{-1} \quad (4.3)$$

onde: $Z_{\frac{\alpha_0}{2}}$: é um valor crítico ao nível de significância α_0 ;

$\theta_{\beta_0}^{-1}$: é uma função de probabilidade inversa da distribuição normal reduzida.

Tabela 4.2: Parâmetros de não-centralidade

Poder de Teste ($1 - \beta_0$)	Nível de Significância (α_0)			
	$\alpha_0 = 0,01\%$	$\alpha_0 = 0,10\%$	$\alpha_0 = 1\%$	$\alpha_0 = 5\%$
50%	3,72	3,29	2,58	1,96
70%	4,41	3,82	3,10	2,48
80%	4,73	4,13	3,42	2,80
90%	5,17	4,57	3,86	3,24
95%	5,54	4,94	4,22	3,61
99%	6,22	5,62	4,90	4,29
99,90%	6,98	6,38	5,67	5,05

Fonte:[16]

4.2.2 Escolha dos níveis de significância e poder de teste

Quando são aplicados os testes de Baarda, TGM e o *data-snooping*, para a detecção e localização de erros grosseiros, os valores para os níveis de significância e potências de teste podem ser escolhidos.

Foi proposto que o poder do teste $(1 - \beta_0)$ seja constante para ambos os testes. Para os níveis de significância, foram propostos α e α_0 , para o teste global e o teste *data-snooping*, respectivamente.

Segundo Kavouras (1982)² apud [17], para encontrar o parâmetro de não-centralidade, sabendo que β e β_0 são constantes, existem dois procedimentos:

1. encontrar o parâmetro de não-centralidade unidimensional λ_0 pela equação 4.1, através da escolha de α_0 e β_0 e assim, obter o parâmetro de não-centralidade multidimensional pela equação $\alpha_0 = \delta_0^2$; e
2. calcular o nível de significância multidimensional α para $\lambda_0 = \lambda(\alpha, \beta_0, r)$.

O nível com maior preocupação para o teste é a seleção de α_0 . Segundo [16], o valor usual para a potência do teste é de 80% e de 0,1% para α_0 . Com esses valores recomendados para a potência do teste e nível de significância, resultará em um parâmetro de não-centralidade grande. Quanto menor a potência de teste e menor o nível de significância, maior será o valor encontrado para o parâmetro de não-centralidade. Assim, alguns erros grosseiros poderiam não ser encontrados.

Conforme as tecnologias de levantamentos vão melhorando, os níveis de precisão também melhoram. Desta forma, os níveis recomendados de 80% para a potência de teste e 0,1% para nível de significância, não conseguirão detectar prováveis erros nas observações, o que leva os usuários a utilizarem valores para potência de teste de 80% e 5% para o nível de significância.

4.2.3 Confiabilidade externa

Após aplicar a confiabilidade interna e encontrar o erro mínimo que pode ser detectado pelo teste nas observações, equação 4.1, torna-se necessário saber como os parâmetros responderão a esses erros. Assim, a confiabilidade externa é definida como a quantidade em que o menor erro encontrado na observação pode influenciar no cálculo das coordenadas dos pontos.

A estimativa das coordenadas dos pontos, com base no ajustamento de observações no método paramétrico, é fornecida por:

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (4.4)$$

²Kavouras, M. (1982). On detection of outliers and the determination of reliability in geodetic networks. Technical report No 87. Department Surveying Engineering. University of New Brunswick

onde:

A : matriz das derivadas das equações de observação em relação às incógnitas;

P : matriz dos pesos das observações;

L : vetor da diferença entre o vetor dos valores calculados e o vetor dos valores observados.

Supondo que as equações contenham erros que não foram detectados ($\nabla_0 l_i$) reescreve-se a equação desta forma:

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P (L - l_i \nabla_0 l_i) \quad (4.5)$$

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L + (A^T P A)^{-1} A^T P (l_i \nabla_0 l_i) \quad (4.6)$$

onde:

l_i : corresponde a i -ésima coluna de uma matriz identidade $n \times n$.

Portanto, a influência dos erros grosseiros não detectados $\nabla_0 l_i$ na estimação das coordenadas é dada por:

$$\nabla X = (A^T P A)^{-1} A^T P (l_i \nabla_0 l_i) \quad (4.7)$$

4.3 Análise geométrica de deformação

De acordo com [2] e Chrzanowski et al. (1983³ apud [16]) os parâmetros de deformações podem ser obtidos se uma função deslocamento é conhecido $d(u, v, w)$. A função de deslocamento pode ser obtida ajustando um selecionado modelo de deformação em função do deslocamento determinado como pontos discretos, conforme equação 4.8. Portanto, o modelo deslocamento-deformação é dado:

$$d(x, y, z, t - t_0) = B(x, y, z)e + a \quad (4.8)$$

onde:

d : vetor das componentes do deslocamento de um ponto (x, y, z) no tempo t com relação à t_0 ;

B : corresponde a matriz das derivadas parciais dos polinômios com relação às posições do ponto de observação;

a : vetor dos coeficientes do ponto analisado; e e : o vetor das incógnitas (parâmetros de deformação).

³Chrzanowski, A.; Y. Q. Chen and J. M. Secord. On the strain analysis of tectonic movements using fault crossing geodetic surveys. Tectonophysics, 97, pp. 297-315

O deslocamento da equação 4.8 pode ser descrito em função das componentes u , v e w : $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$ e $w(x, y, z)$, que são funções contínuas e analíticas, e representam o deslocamento sofrido pelo ponto nas direções x, y e z , respectivamente.

Os parâmetros de deformação podem ser expressos como derivadas parciais de primeira ordem de uma função deslocamento [17]. O tensor de deformação pode ser representado em forma matricial, conforme a seguinte equação:

$$E = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

O tensor E pode ser decomposto em outros dois tensores, um simétrico (ε) e outro anti-simétrico (ω).

$$E = \varepsilon + \omega \quad (4.10)$$

$$E = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right) & 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

onde:

ε : representa o cisalhamento puro (deformação pura); e

ω representa o ângulo de cisalhamento (deformação de corpo rígido).

Segundo [16], a seleção do modelo de deformação dependerá das análises das informações a priori da região disponíveis. Em [6], o plano é considerado ser a melhor aproximação de uma função de deslocamento local em cada ponto.

Os gradientes da função de deslocamento local são avaliados separadamente para cada componente de coordenada. Este gradiente, ao longo de cada eixo de coordenada, fornece as componentes da matriz de deformação.

Ajustando a superfície de um plano para cada função de deslocamento resulta em uma simples determinação dos tensores, onde os componentes do tensor é a inclinação dos planos na direção de cada eixo de coordenada.

Sendo a função deslocamento dada, equação 4.8, como um vetor: $d_i(u, v, w)$, a mesma pode ser decomposta em função de suas componentes [18].

$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z) = B_u(x, y, z, t - t_0)e, \\ v &= v(x, y, z) = B_v(x, y, z, t - t_0)e, \\ w &= w(x, y, z) = B_w(x, y, z, t - t_0)e. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Desenvolvendo estas equações como polinômios de primeiro grau, para o caso tri-dimensional:

$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) + a_3(z - z_0), \\ v &= v(x, y, z) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) + b_3(z - z_0), \\ w &= w(x, y, z) = c_0 + c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) + c_3(z - z_0). \end{aligned} \quad (4.13)$$

onde:

(x_0, y_0, z_0) : são coordenadas do ponto analisado, conectado a (x, y, z) , que são as coordenadas de um ponto conhecido, por uma observação.

Os coeficientes, relacionados a seguir, são como aproximações do tensor de deformação:

$$\begin{aligned} a_1 &= \partial u / \partial x, a_2 = \partial u / \partial y, a_3 = \partial u / \partial z, \\ b_1 &= \partial v / \partial x, b_2 = \partial v / \partial y, b_3 = \partial v / \partial z, \\ c_1 &= \partial w / \partial x, c_2 = \partial w / \partial y, c_3 = \partial w / \partial z. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Os coeficientes a_0 , b_0 e c_0 são em função das coordenadas do ponto analisado: $a_0 = u(x_0, y_0, z_0)$, $b_0 = v(x_0, y_0, z_0)$ e $c_0 = w(x_0, y_0, z_0)$.

A obtenção das componentes da função deslocamento é encontrada pela comparação das coordenadas entre duas épocas:

$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z) = x^2 - x^1; \\ v &= v(x, y, z) = y^2 - y^1; \\ w &= w(x, y, z) = z^2 - z^1. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Considerando n pontos conhecidos, os parâmetros de deformação podem ser encontrados em relação a um ponto P_0 , utilizando-se das seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(x_1, y_1, z_1) = a_0 + a_1(x_1 - x_0) + a_2(y_1 - y_0) + a_3(z_1 - z_0) \\ v(x_1, y_1, z_1) = b_0 + b_1(x_1 - x_0) + b_2(y_1 - y_0) + b_3(z_1 - z_0) \\ w(x_1, y_1, z_1) = c_0 + c_1(x_1 - x_0) + c_2(y_1 - y_0) + c_3(z_1 - z_0) \\ \vdots \\ u(x_n, y_n, z_n) = a_0 + a_1(x_n - x_0) + a_2(y_n - y_0) + a_3(z_n - z_0) \\ v(x_n, y_n, z_n) = b_0 + b_1(x_n - x_0) + b_2(y_n - y_0) + b_3(z_n - z_0) \\ w(x_n, y_n, z_n) = c_0 + c_1(x_n - x_0) + c_2(y_n - y_0) + c_3(z_n - z_0) \end{array} \right. \quad (4.16)$$

Em forma matricial, as equações são reescritas da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} u(x_1, y_1, z_1) \\ v(x_1, y_1, z_1) \\ w(x_1, y_1, z_1) \\ \vdots \\ u(x_n, y_n, z_n) \\ v(x_n, y_n, z_n) \\ w(x_n, y_n, z_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1 - x_0) & (y_1 - y_0) & (z_1 - z_0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (x_1 - x_0) & (y_1 - y_0) & (z_1 - z_0) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_n - x_0) & (y_n - y_0) & (z_n - z_0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (x_n - x_0) & (y_n - y_0) & (z_n - z_0) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ c_0 \\ a_0 \\ b_0 \\ c_0 \\ a_0 \\ b_0 \\ c_0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Aplicando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) nas equações, o modelo deslocamento-deformação dado na equação 4.8 terá a seguinte solução:

$$E = (B^T P B)^{-1} B^T P d \quad (4.18)$$

onde P é a matriz peso do vetor deslocamento.

4.4 Robustez de rede 3D

De posse das coordenadas tridimensionais (3D) de uma rede geodésica obtidas do ajustamento da mesma, calcula-se o *erro máximo não detectável* $\nabla_0 l$, com base no

parâmetro de não-centralidade λ_0 e nos níveis α_0 e β_0 , para cada ponto da rede, como visto na subseção 4.2.1.

De posse desta quantidade, para cada ponto, calcula-se a *influência deste erro nas coordenadas*, como visto na subseção 4.2.3.

$$\nabla X = (A^T P A)^{-1} A^T P (l_i \nabla_0 l) \quad (4.19)$$

Assim, para um ponto P_i , obtém-se um *vetor do deslocamento* causado pelo erro, da seguinte forma:

$$\nabla X_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

onde: u_i , v_i e w_i são as componentes do deslocamento decomposta nos três eixos.

Sendo a função deslocamento dada como um vetor: $\vec{X}_i(u_i, v_i, w_i)$, a mesma, pode ser decomposta em função de suas componentes:

$$\begin{aligned} u_i &= u(x, y, z), \\ v_i &= v(x, y, z), \\ w_i &= w(x, y, z). \end{aligned} \quad (4.21)$$

Os parâmetros de deformação são expressos como derivadas parciais de primeira ordem de uma função deslocamento, como visto na subseção 4.3. Na forma matricial, E , essas derivadas são denominadas de tensor de deformação, equação 4.9:

Desenvolvendo as equações 4.21 como polinômios de primeiro grau, para o caso tridimensional:

$$\begin{aligned} u_i &= u(x, y, z) = a_0 + \frac{\partial u_i}{\partial x}(X_j - X_i) + \frac{\partial u_i}{\partial y}(Y_j - Y_i) + \frac{\partial u_i}{\partial z}(Z_j - Z_i), \\ v_i &= v(x, y, z) = b_0 + \frac{\partial v_i}{\partial x}(X_j - X_i) + \frac{\partial v_i}{\partial y}(Y_j - Y_i) + \frac{\partial v_i}{\partial z}(Z_j - Z_i), \\ w_i &= w(x, y, z) = c_0 + \frac{\partial w_i}{\partial x}(X_j - X_i) + \frac{\partial w_i}{\partial y}(Y_j - Y_i) + \frac{\partial w_i}{\partial z}(Z_j - Z_i). \end{aligned} \quad (4.22)$$

onde (X_i, Y_i, Z_i) são coordenadas do ponto de interesse P_i , conectado a (X_j, Y_j, Z_j) , que são as coordenadas de um ponto P_j , conectados por uma observação. Os coeficientes a_i , b_i e c_i referem ao ponto P_i .

Para quaisquer pontos da rede, as equações podem ser escritas desta forma:

$$\begin{aligned}
u_i &= K \begin{bmatrix} a_0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial x} \\ \frac{\partial u_i}{\partial y} \\ \frac{\partial u_i}{\partial z} \end{bmatrix}, \\
v_i &= K \begin{bmatrix} b_0 \\ \frac{\partial v_i}{\partial x} \\ \frac{\partial v_i}{\partial y} \\ \frac{\partial v_i}{\partial z} \end{bmatrix}, \\
w_i &= K \begin{bmatrix} c_0 \\ \frac{\partial w_i}{\partial x} \\ \frac{\partial w_i}{\partial y} \\ \frac{\partial w_i}{\partial z} \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{4.23}$$

onde: $K = [1, (X - X_i), (Y - Y_i), (Z - Z_i)]$.

As equações podem ser resolvidas com o MMQ:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} a_0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial x} \\ \frac{\partial u_i}{\partial y} \\ \frac{\partial u_i}{\partial z} \end{bmatrix} &= (K^T K)^{-1} K^T u_i = N_{u_i} u_i, \\
\begin{bmatrix} b_0 \\ \frac{\partial v_i}{\partial x} \\ \frac{\partial v_i}{\partial y} \\ \frac{\partial v_i}{\partial z} \end{bmatrix} &= (K^T K)^{-1} K^T v_i = N_{v_i} v_i, \\
\begin{bmatrix} c_0 \\ \frac{\partial w_i}{\partial x} \\ \frac{\partial w_i}{\partial y} \\ \frac{\partial w_i}{\partial z} \end{bmatrix} &= (K^T K)^{-1} K^T w_i = N_{w_i} w_i.
\end{aligned} \tag{4.24}$$

Desde as investigações destes estudos, nas relações entre o vetor deslocamento e a matriz de deformação, os termos constantes não são relevantes [19].

Desta forma, as equações são agrupadas e montadas da seguinte forma:

$$E_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{u_i} & 0 & 0 \\ 0 & N_{v_i} & 0 \\ 0 & 0 & N_{w_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

Substituindo a equação 4.20 na equação 4.25 e chamando a matriz composta de N de T , tem-se:

$$E_i = T\nabla X_i \quad (4.26)$$

Substituindo a equação 4.19 na equação 4.26, obtém-se:

$$E_i = T(A^T P A)^{-1} A^T P (li \nabla_0 l) \quad (4.27)$$

Antes do cálculo do deslocamento do ponto P_i , torna-se necessário calcular as *condições iniciais*. Como as equações formam um sistema de equações diferenciais e de primeira ordem, a norma do vetor deslocamento de todos os pontos na rede é minimizada.

Para resolvê-las, devem-se integrá-las, onde o processo de integração é explicado em [20]. Basicamente, a condição dirá onde a rede estava localizada antes da deformação.

Desta forma, as condições iniciais são dadas pelo cálculo de X_0 , Y_0 e Z_0 . De posse desses valores calcula-se o deslocamento do ponto P_i , nas três componentes, por:

$$\begin{bmatrix} d_{u_i} \\ d_{v_i} \\ d_{w_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Após o cálculo das componentes do deslocamento de cada ponto da rede, pode-se calcular a *quantidade total de deslocamento*, ou seja, o *deslocamento real do ponto* no espaço:

$$D_i = \sqrt{d_{u_i}^2 + d_{v_i}^2 + d_{w_i}^2} \quad (4.29)$$

4.5 Limiaries

Após obter as coordenadas e sua MVC (Matriz Variância Covariância), é possível, com base na elipse padrão de erros, obter uma interpretação visual do resultado. Esta elipse é obtida pelos seus semi-eixos maior (a) e menor (b). Usando os elementos da matriz de covariância dos parâmetros, os mesmos são calculados por:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= 0,5(\sigma_x + \sigma_y) + 0,5M \\ \sigma_y^2 &= 0,5(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - 0,5M \\ M &= \sqrt{4\sigma_x^2\sigma_y^2 + (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Os valores σ_x^2 e σ_y^2 proporcionam os semi-eixos maior e menor da elipse de erros:

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\sigma_{x'}^2} \\ b &= \sqrt{\sigma_{y'}^2} \end{aligned} \quad (4.31)$$

A elipse obtida com a e b é denominada de *elipse dos erros padrão*, e tem 39% de probabilidade de que o ponto esteja dentro dela.

A elipse de confiança é obtida multiplicando o valor dos semi-eixos $\sigma_{x'}^2$ e $\sigma_{y'}^2$ por um fator K , conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Níveis de probabilidade da elipse

Probabilidade	Distribuição	$\chi_{2g,l}^2$	$K = \sqrt{\chi_{2g,l}^2}$
99,5%	10,5966		3,26
95%	5,991		2,45
90%	4,605		2,15
70%	2,409		1,55
50%	1,3863		1,18

Por exemplo, a elipse padrão com 95% de probabilidade será:

$$\begin{aligned} a_{95\%} &= K\sigma_{x'} = 2,45\sigma_{x'} \\ b_{95\%} &= K\sigma_{y'} = 2,45\sigma_{y'} \end{aligned} \quad (4.32)$$

Para obter o intervalo de confiança que representará a altura elipsoidal, ou seja, a terceira componente h (altura geométrica), será calculado pela multiplicação de σ_h , extraído da matriz covariância, por um fator de expansão da raiz quadrada de uma Qui-Quadrado de um grau de liberdade $\chi_{(1g,l)}^2$. Portanto, para um intervalo de confiança de 95%, tem-se:

$$h_{95\%} = \sqrt{\chi_{(1g,l)}^2} \sigma_h = 1,96\sigma_h \quad (4.33)$$

Desta forma, os valores limites, para cada ponto, são:

$$\delta_i = \sqrt{a_{95\%}^2 + b_{95\%}^2 + h_{95\%}^2} \quad (4.34)$$

Realiza-se a análise de robustez com a comparação dos deslocamentos calculados pela equação 4.29 e equação 4.34. Se para um dado ponto P_i , $D_i > \delta_i$, diz-se que a rede neste local é fraca, ou seja, não é “robusta”. Se $D_i < \delta_i$, a rede neste local é dita “robusta” a certo nível de probabilidade.

5 Materiais e métodos

5.1 Introdução

Este capítulo aborda quais os materiais utilizados e as metodologias adotadas para o desenvolvimento da pesquisa. Baseado no objetivo do trabalho, a metodologia buscou encontrar formas de resolver o problema proposto, o qual neste caso era *encontrar uma métrica para definição de pontos estáveis baseadas em soluções de posicionamento por ponto preciso e análise de robustez*. Na Figura 5.1, segue um fluxograma apresentando as principais etapas da pesquisa, as quais resumem visualmente os passos que devem ser seguidos para execução da metodologia proposta.

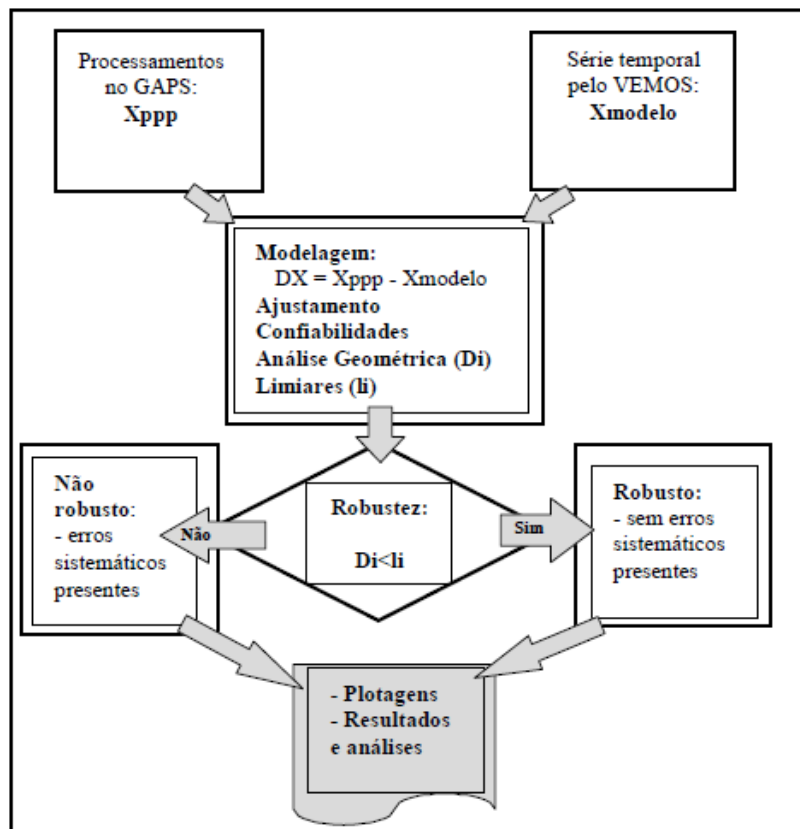


Figura 5.1: Fluxograma de execução do projeto.

Assim, nas seções seguintes, após a apresentação dos materiais utilizados, segue o desenvolvimento da metodologia proposta.

5.2 Materiais

A área para realização dos experimentos foi escolhida de forma que contivessem estações que pertencessem à RBMC. Já para a escolha das estações, adotou-se os seguintes critérios como referência:

1. Séries temporais com maiores quantidades de dados;
2. Histórico de variações conhecidas;
3. Estações com históricos sem variações;
4. Estações litorâneas; e
5. Estações no interior do país.

Assim, conforme os critérios listados acima, as estações escolhidas foram as seguintes:

1. : BRAZ e FORT(BRFT);
2. : BRAZ, NAUS(MANA) e IMPZ;
3. : CHPI;
4. : IMBT e RECF; e
5. : CUIB.

Na Figura 5.2, identificadas por círculos vermelhos, segue a distribuição geográfica das estações.



Figura 5.2: Distribuição dos pontos.

Fonte: IBGE, disponível em: ftp://geofp.ibge.gov.br/RBMC/relatorio/RBMC_2014.pdf

Nos experimentos, foram utilizados arquivos de observações por satélites (RINEX - *Receiver INdependent EXchange Format*), das estações listadas de acordo com os critérios, os quais foram obtidos por duas fontes, via IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e de Pinto e Frigato¹ (2009).

O comprimento das séries temporais variam de acordo com a disponibilidade de dados de cada estação. A maioria dos dados foram adquiridos desde 2001 até o ano de 2011. Assim, visualizam-se a disponibilidade de dados por ano de cada estação na Tabela 5.1.

¹PINTO, M. S. e FRIGATO, R. *Estimativa da Velocidade da Placa Litosférica Sul-Americana com base nas Estações da RBMC a partir do Processamento de dados GPS*. Relatório de Trabalho final (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente, SP, 2009.

Tabela 5.1: Disponibilidade dos dados

Estação	Braz	Fort/Brft	Mana/Naus	Impz	Chpi	Imbt	Recf	Cuib
Ano	Quantidade de arquivos por ano (%)							
01	97,8	95,3	36,2	79,5	-	-	95,3	92,9
02	96,7	80,3	13,2	84,9	-	-	94,8	86,3
03	99,4	89,9	50,1	79,2	-	-	77,8	90,4
04	100	80,8	/-	84,1	-	-	94,5	97,0
05	99,4	75,6	-	61,4	-	-	84,7	93,7
06	91,2	24,4/97,5	95,1	77,0	-	-	93,4	99,7
07	61,1	97,8	55,1	49,6	92,1	32,1	50,4	60,8
08	98,4	95,8	100	99,2	96,2	88,2	95,1	100
09	97,5	94,5	98,3	97,0	98,0	97,0	100	99,7
10	92,3	63,7	92,3	92,3	92,1	92,3	91,2	92,1
11	92,3	83,8	83,0	92,3	91,2	72,1	84,9	92,3

Para obtenção da série temporal pelo posicionamento por ponto preciso utilizou-se o *software* GAPS (*GPS Analysis and Positioning Software*), desenvolvido na University of New Brunswick (UNB) para determinar outros parâmetros juntamente com a posição, erro do relógio do receptor e atraso atmosférico neutro utilizando-se de informações precisas de relógios e órbitas dos satélites [4]. Estes outros parâmetros, segundo [4] são: atrasos ionosféricos, atraso dos *hardwares*, erro do relógio dos satélites, multicaminho, dentre outros.

Uma descrição de todos os erros considerados no PPP pode ser encontrado em KOUBA(2003² apud [4]).

Segundo [4], e a configurações e sistemática adotada pelo GAPS são as seguintes:

- Observável utilizada: *ion-free* para o código e fase da onda portadora;
- Parâmetros estimados:
 - Posição do receptor (X, Y, Z);
 - Erro do relógio do receptor (dT); e
 - Atraso troposférico neutro total (T).
- Informações a priori:
 - Órbitas e relógios precisos dos satélites;

²Kouba J (2003) A guide to using International GPS Service (IGS) products [online]. IGS Central Bureau February 2003 Avail at <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf>

- Outros parâmetros estimados no processo:
 - Atraso ionosférico;
 - Atraso nos códigos (devido ao *hardware* do satélite e receptor);
 - Erros do relógio dos satélites;
 - Multicaminho;
- Modelos considerados no processo de estimativa:
 - Marés terrestres;
 - Deslocamentos do centro de fases das antenas e variações;
 - Atraso do código nos satélites (em casos que o código C/A é utilizado);
 - Fase *Wind-up*;
 - Efeitos relativísticos e outros.

As séries temporais pelo modelo de velocidade foram obtidas utilizando o modelo de velocidades para a América do Sul e Caribe, o VEMOS2009. Segundo [21], o VEMOS2009 teve como maior motivação para a sua concepção a necessidade de um modelo de movimento da crosta terrestre mais realístico do que os modelos de placas, os quais eram altamente utilizados até então (DE METS et al., 1990³, 1994⁴ apud [21]).

Assim, para obtenção de um modelo que representasse melhor os movimentos da placa Sul-Americana e Caribe, foram utilizados como dados de entrada, velocidades de várias soluções e de diferentes projetos. Na Tabela 5.2, visualizam-se a série temporal de observação dos dados e a quantidade de velocidades utilizadas no ajustamento [21].

³DeMets C, Gordon RG, Argus DF, Stein S (1990) Current plate motions. *Geophys J Int* 101:425?478

⁴DeMets C, Gordon RG, Argus DF, Stein S (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys Res Lett* 21(20):2191?2194

Tabela 5.2: Dados de entrada para o VEMOS2009

Projeto	Série Temporal das observações	Quantidade de estações
SIR09P01	2000-2008	95
SIRGAS 00-95	1995-2000	28
CASA (East)	1998-2002	21
CASA (West)	1991-1998	31
CASA (Cali)	1996-2003	17
CAP-SNAPP	1993-2001	54
CAP	1993-2001	60
SAGA North	1996-1997	32
SAGA South	1994-1996	68
Scotia-SOAM	-	19
Constitución	1996-2002	65
Chile (others)	2004-2006	6

Fonte: [21]

Para o processamento dos dados dos diferentes projetos, todos foram transformados para a solução SIR09P01 (ITRF2005), com base nos pontos comuns entre eles. Posteriormente, todas as velocidades foram reduzidas à placa Sul Americana, utilizando os parâmetros estimados para a rotação da placa. As estações comuns foram analisadas com relação à confiabilidade (número e comprimento do período de observação, intervalo total de cobertura) [21]. Após a edição dos dados de entrada, utilizaram-se duas abordagens para a obtenção dos parâmetros, o Método de Elementos Finitos (MEF) e Mínimos Quadrados por Colocação (MQC).

Segundo [21], comparando-se o VEMOS2009 com a versão anterior, o VEMOS2003, os melhoramentos foram os seguintes:

- Maiores diferenças do VEMOS2003 para o VEMOS2009 foram obtidas onde há pouco ou nenhum dado disponível (Peru e Bolívia);
- Diferenças na Colômbia são devido aos novos dados de estações contínuas SIRGAS;
- Diferenças no sul do Chile são devido aos dados de projetos recentes;
- Precisão global das velocidades dos pontos foi melhor que ± 1 mm/a na direção Sul-Norte e aproximadamente $\pm 1,5$ mm/a na direção Oeste-Leste para ambos MEF e MQC.

De maneira geral, o VEMOS2009 utilizou-se de 500 velocidades de estações observadas em 13 diferentes projetos GPS, fornecendo assim uma boa base para modelar o

campo de velocidades da crosta na região Sul Americana e Caribe. O VEMOS pode ser visualizado na Figura 5.3

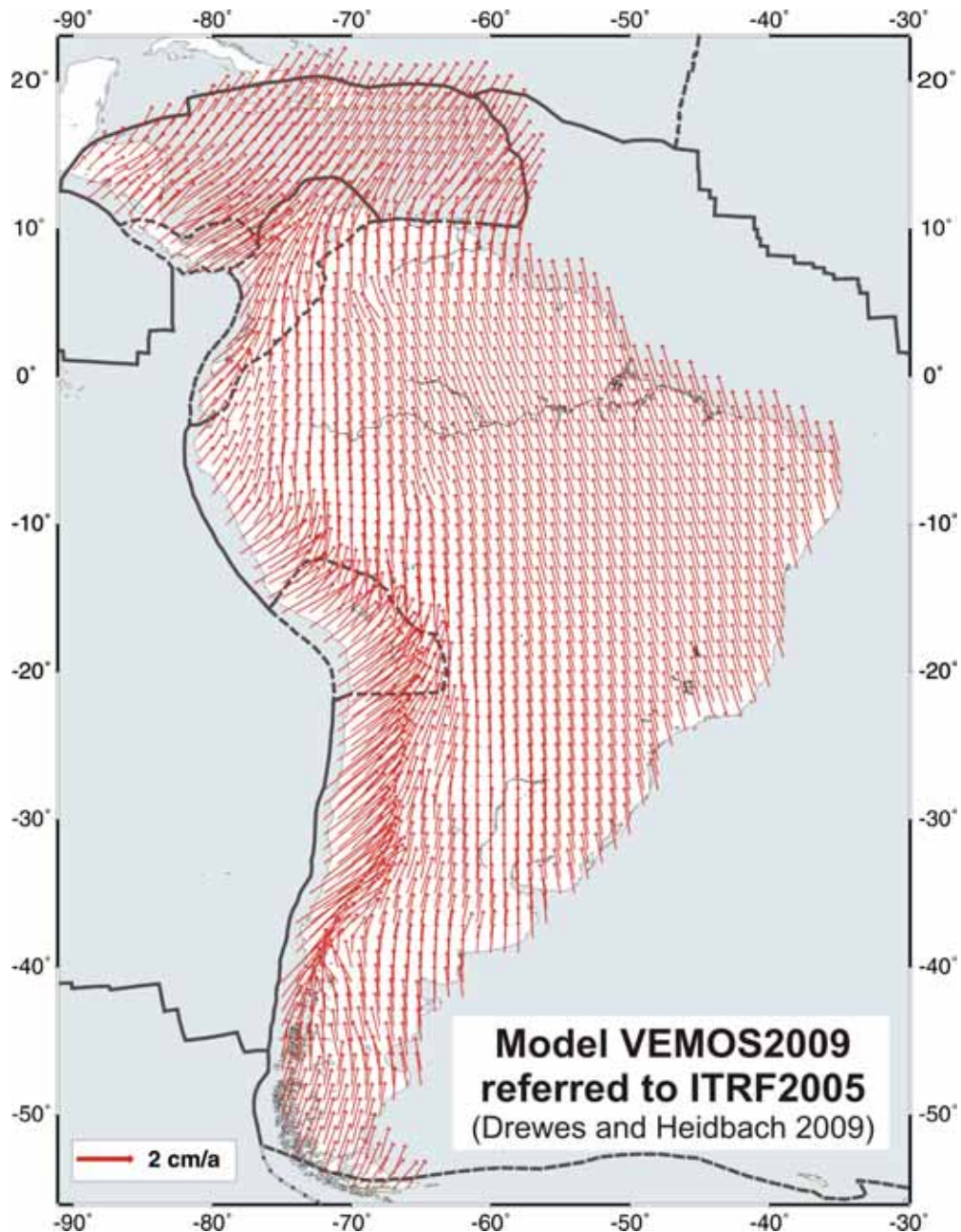


Figura 5.3: Modelo de velocidades VEMOS2009.

Fonte: [21]

Para realizar todos os cálculos do projeto foi utilizado o *software* MATLAB (Matrix Laboratory). MATLAB é um *software* amplamente utilizado em qualquer área de matemática aplicada. O *software* foi construído pelo principal desenvolvedor de *softwares* computacionais para matemática e engenharia, a *MathWorks*. MATLAB trata-se de uma linguagem técnica da computação, sendo um ambiente de programação para desenvolvimentos de algoritmos, análises de dados, visualização e computação numérica.

5.3 Metodologia

Assim que os metadados estavam preparados, a metodologia de ação para a execução da proposta segue, em linhas gerais, as seguintes etapas:

1. Processamento dos dados no *software* GAPS;
2. Obtenção das séries temporais pelo modelo VEMOS2009 de velocidades;
3. Cálculos das quantidades utilizando as rotinas implementadas no MATLAB; e
4. Análise e interpretação dos resultados.

5.3.1 Processamento dos dados no *software* GAPS

As séries temporais pelo PPP foram obtidas utilizando o *software* GAPS. Como descrito em 5.2, que modela praticamente todos os efeitos sistemáticos envolvidos no posicionamento por satélite.

O processamento pode ser realizado via acesso remoto ao servidor localizado no Laboratório de Geodésia na UNB, ou, quando houver uma grande quantidade de dados, o processamento pode ser realizado utilizando um executável disponibilizado pelo grupo de pesquisa responsável pela manutenção do GAPS. Como neste projeto trabalhou-se com um grande volume de dados, foi disponibilizado para fins de pesquisa, um executável do GAPS para executar os processamentos em uma máquina local.

Assim que o *software* estiver instalado, para iniciar os processamentos deve-se organizar os arquivos RINEX no diretório RAW, que se encontra no diretório C:\gapsOnline\RAW do GAPS. No caso deste projeto, os dados foram processados anualmente para cada estação, os arquivos com os resultados são encontrados no diretório OUT (C:\gapsOnline\OUT).

Para realizar o processamento, no diretório SRC (C:\gapsOnline\SRC) executa-se, via *prompt* de comando, para cada arquivo RINEX diário o seguinte comando:

```
autoDPL esta0010.YYO 0 10 unbvmf1 std 0.10 5 -1 -1 1 1 none 0 jpg Fonte: http:\\
gaps.gge.unb.ca \ppp_results\735510.112392alic0010_10o\alic0010_10o.html
```

As Figuras 5.4 e 5.5 contêm explicações sobre a ordem e descrição dos parâmetros disponíveis no comando, respectivamente.

gaps_executable	obsname	tp	el	mftype	otype	nsd	nrv	nhzg	nrwhg	ot	bt	blqfile	useAPL	pic
gaps_executable	HPNX2130.11o.gz	0	10	vmf1	std	0.10	5	-1	-1	0	1	none	0	jpg

Figura 5.4: Ordem dos parâmetros.

Fonte: http:\\gaps.gge.unb.ca\ppp_results\735510.112392alic0010_10o\alic0010_10o.html

obsname	name of RINEX file (compressed or un-compressed)	*.10o, *.10o.Z, *.10d, *.10.Z, etc
tp	processing mode for AUTODPL	'0' = static, '1' = kinematic
el	elevation cut off angle	0, 5, 10, etc in degrees
mftype	mapping function type	vmf1,unbvmf1,unbvmf1cmc,unbvmf1p
otype	orbit type	std or reprot
nsd	a priori standard deviation of neutral atmospheric delay	'-1' = off unit in metres
nrw	process noise for natural atmospheric delay	'-1' = off units in mm/hour
nhzg	a priori standard deviation of tropospheric gradients	'-1' = off units in m
nrwhg	process noise for tropospheric gradients	'-1' = off units in mm/hour
ot	ocean tidal loading flag	'1' = on, '0' = off
bt	body tide loading flag	'1' = on, '0' = off
blqfile	blq file with OTL correction parameters	'none' = use station parameters in IGStations.txt OR enter your own file name to use (*blq)
useAPL	atmpsheric pressure loading corrections	'1' = on, '0' = off
pic	picture display format	('1' = emf, '2' = jpg, '3' = bmp) (recommended is '2')

Figura 5.5: Descrição dos parâmetros.

Fonte: http://gaps.gge.unb.ca/ppp_results/735510.112392alic0010_10o/alic0010_10o.html

Os tempos de processamentos iniciais, para um ano de dados, foram em média de 12 a 16 horas. Ao realizar os processamentos para o mesmo ano, porém para outra estação, os tempos de processamento foram em média 3 a 4 horas.

Os parâmetros adotados nos processamentos foram os mesmo descritos no comando anteriormente.

Os resultados dos processamentos, para cada dia, são armazenados em diretórios no diretório OUT. Os arquivos de saída são os seguintes:

- *.par: arquivo com os parâmetros: coordenadas e desvios-padrão, atraso atmosférico e relógio do receptor;
- *.std: arquivo contendo o desvio padrão da estação;
- *.res: arquivo com os resíduos das observáveis; e

Para agilizar os processamentos foram criadas rotinas em MATLAB e arquivos *batch* de comando para automatizar os processamentos e extrações das informações necessárias dos arquivos de saída.

As quantidades de interesse para os cálculos são as coordenadas e desvios-padrão das estações processadas. Assim, para cada dia de resultados dos processamentos, retirava-se a última estimativa do arquivo que continha as coordenadas, o arquivo *.par, e o respectivo desvio padrão, no arquivo *.std. Posteriormente, foram geradas as séries temporais pelo PPP, as quais, juntamente com a série temporal pelo modelo, são as entradas para os cálculos.

5.3.2 Séries temporais obtidas do modelo de velocidades

Para que sejam feitas as análises do projeto, deve-se comparar séries temporais pelo PPP com o modelo de velocidades que melhor descreve o movimento da placa Sul-Americana. O modelo VEMOS2009, como descrito em 5.2, é o melhor e mais atual modelo de velocidades para a América do Sul e Caribe.

O modelo VEMOS2009 trata-se de um *grid* no qual interpola a velocidade em uma dada posição geográfica, latitude e longitude. Antes de utilizar o modelo de velocidades deve-se obter a posição das estações de interesse no mesmo referencial do modelo, no qual o VEMOS2009 encontra-se no ITRF2005.

Desta forma, a obtenção da série temporal pelo modelo de velocidades, teve a seguinte sistemática:

- Obtenção das coordenadas das estações: Solução SIRGAS2000 (ITRF2000);
- Compatibilização de referenciais;
- Obtenção das velocidades: VEMOS2009; e
- Cálculo das séries temporais para cada estação;

Nesta abordagem, transformaram-se as coordenadas para o ITRF2005, para compatibilização do referencial de saída do GAPS, conforme o esquema abaixo:

- Compatibilização dos referenciais da série temporal obtidas pelos modelos e o GAPS

$$X_{ITRF2000}^{2000.4} \xrightarrow{\text{Helmert14param}} X_{ITRF2005}^{\text{mesmaepocaentrada}}$$

A série temporal acompanha a disponibilidade de dados processados no PPP. Assim, aplicaram-se as respectivas velocidades, $(V = (v_X, v_Y, v_Z))$, nas coordenadas, $X_{ITRF2005} = (X, Y, Z)$, para obtenção da série temporal, utilizando-se do seguinte modelo:

$$X_{VEMOS2009} = X_{ITRF2005} + V(t - t_0)$$

onde:

$X_{VEMOS2009}$: série temporal pelo modelo VEMOS2009;

t_0 : corresponde à época de obtenção das coordenadas; e

t : correspondente à época de variação da série temporal pelo PPP.

5.3.3 Métrica para definição de pontos estáveis

Ao analisar a série temporal de uma estação na superfície terrestre com relação ao tempo, o seu comportamento pode ser separado em dois tipos: continentais (δ_{MC}) e locais (δ_{ML}), como ilustrado na Figura 5.6.

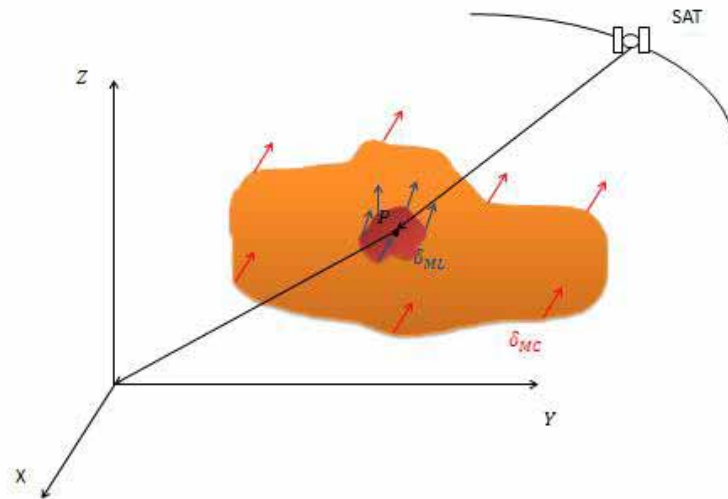


Figura 5.6: Movimentos continentais e locais.

Fonte: O autor.

Com base nesta ilustração, descreve-se o efeito destes movimentos:

Movimentos continentais (δ_{MC}):

- o efeito deste movimento causa uma tendência na visualização da série. Esta tendência geralmente é melhor observada nas componentes planimétricas.

Movimentos locais (δ_{ML}):

- os movimentos locais estão relacionados com os movimentos ou deformação da geologia local. Este movimento pode ou não ter um padrão, por ex.: efeitos sazonais.

O movimento total de um ponto pode ser descrito como a soma destes dois efeitos, equação 5.1.

$$\delta_{MT} = \delta_{MC} + \delta_{ML} \quad (5.1)$$

Ao realizar o processamento de um ponto, pelo método PPP de posicionamento, a série temporal do mesmo conterà todos os efeitos, como segue nas equação 5.2. Na Figura 5.7, segue um gráfico ilustrando a série temporal de um ponto qualquer.

$$\begin{aligned} X_{PPP} &= X_{PPP}^{ideal} + \delta_{MT} \\ X_{PPP} &= X_{PPP}^{ideal} + \delta_{ML} + \delta_{MC} \end{aligned} \quad (5.2)$$



Figura 5.7: Ilustração da série temporal pelo PPP.

Fonte: O autor.

Para análise de estabilidade de pontos ou deformações, interessa somente os efeitos locais. Assim, deve-se retirar a influência dos movimentos continentais. Uma estratégia para a obtenção dos efeitos locais seria comparar séries temporais de coordenadas por um modelo de placas, ou velocidades, que melhor descrevesse a região do levantamento, obtendo-se uma série temporal baseada no movimento continental, ilustrado na Figura 5.8.

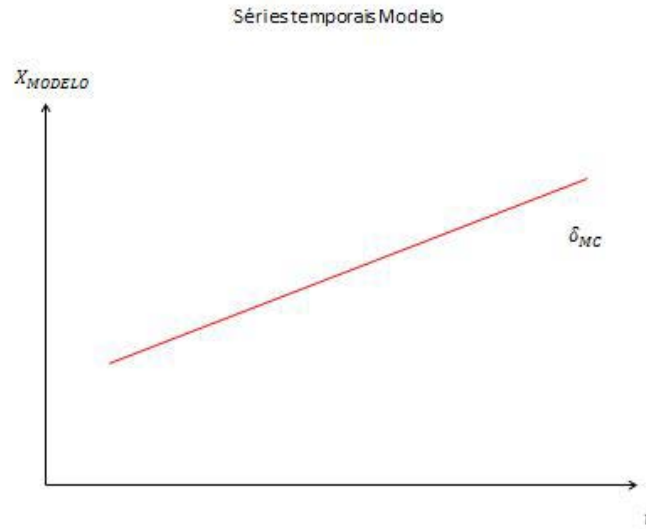


Figura 5.8: Ilustração da série temporal pelo modelo.

Fonte: O autor.

As coordenadas obtidas pelo modelo têm somente influências continentais:

$$X_{modelo} = X_{modelo}^{ideal} + \delta_{MC} \quad (5.3)$$

Quando comparada as séries temporais de coordenadas do modelo com um método de levantamento, tem-se o seguinte:

$$X_{PPP} - X_{modelo} = (X_{PPP}^{ideal} + \delta_{ML} + \delta_{MC}) - (X_{modelo}^{ideal} + \delta_{MC}) \quad (5.4)$$

Considerando que as coordenadas ideais do modelo e do levantamento são iguais ($X_{PPP}^{ideal} = X_{modelo}^{ideal}$), tem-se:

$$X_{PPP} - X_{modelo} = \delta_{ML} \quad (5.5)$$

Os efeitos continentais se cancelam, restando somente os efeitos locais nas coordenadas, como ilustrado na Figura 5.9.

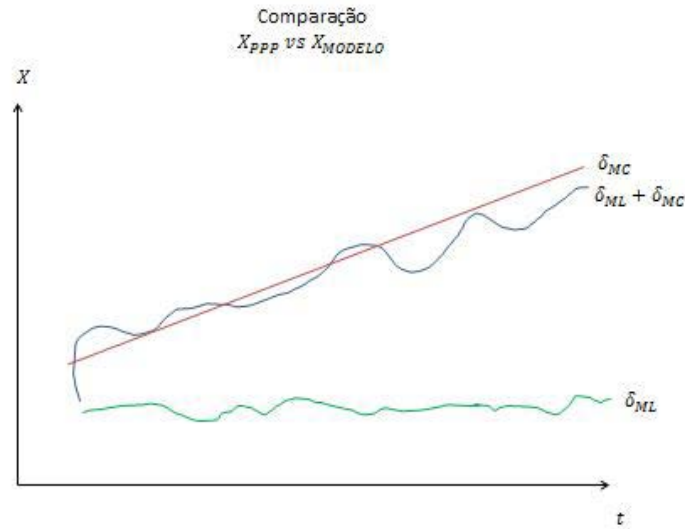


Figura 5.9: Comparação das séries temporais pelo PPP e modelo.

Fonte: autor.

5.3.4 Adaptação da análise de robustez nos resultados PPP e modelo

O movimento local pode ser obtido de diversas soluções. Considerando soluções diárias, para o modelo descrito, para um mês de dados, reúnem-se 30 comparações de coordenadas PPP-modelo ($X_{PPP} - X_{modelo}$). Como, realiza-se a análise para o caso tridimensional, tem-se, para um mês completo de dados, 90 observações. Os parâmetros que se desejam obter são os deslocamentos locais em cada componente para um mês, ou seja, 3 parâmetros, equação 5.6.

$$\delta_{ML_i}^a = \begin{bmatrix} X_{\delta_{ML_i}^a} \\ Y_{\delta_{ML_i}^a} \\ Z_{\delta_{ML_i}^a} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

No ajustamento, considera o método paramétrico ($Lb = F(Xa)$) para o seguinte modelo na equação 5.7:

$$\begin{cases} X_{PPP_i} = \delta_{ML_i}^a + X_{MODELO_i} \\ X_{PPP_{i+1}} = \delta_{ML_{i+1}}^a + X_{MODELO_{i+1}} \\ \vdots \\ X_{PPP_n} = \delta_{ML_n}^a + X_{MODELO_n} \end{cases} \quad (5.7)$$

onde:

X_{PPP} (3x1): vetor das observações;

$\delta_{ML_i}^a(3 \times 1)$: deslocamentos a serem ajustados (parâmetros incógnitos);

$X_{MODELO}(3 \times 1)$: coordenadas fixas.

Todo processo matemático de estimação, quando se tem redundância nas observações, fornecerá resíduos causado pelas flutuações probabilísticas. Porém, efeitos como erros sistemáticos e grosseiros não devem fazer parte do modelo. Antes de modelar ou realizar julgamentos sobre os movimentos locais, estes devem ser analisados de forma a retirar qualquer observação eivada de erros grosseiros e sistemáticos do modelo.

Assim, a análise de robustez, detalhada no capítulo 4, identificará e analisará quais pontos contém erros grosseiros que puderam ou não ser identificados por testes estatísticos globais.

Com as análises de confiabilidade, determina-se a influência do erro máximo não detectável ($\nabla_0 l$) no cálculo dos parâmetros, confiabilidade externa (∇X). Com a análise geométrica de deformações, encontra-se um deslocamento (D_i) em função do tensor de deformação ($E_i = f(\nabla X(\nabla_0 l))$), obtido em função do deslocamento encontrado nas análises de confiabilidades.

Para a obtenção do deslocamento em função do tensor de deformação (D_i), condições iniciais devem ser impostas. No conceito de redes, as condições iniciais significam o centróide da rede, ou seja, onde a rede não deformou em função dos erros máximos não detectados. Para adaptar a técnica de robustez de redes para o conceito do PPP, este deslocamento utilizará como referência as coordenadas do modelo de velocidades VEMOS2009, como segue na equação 5.8.

$$\begin{bmatrix} d_{u_i} \\ d_{v_i} \\ d_{w_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_{MODELO} \\ Y_i - Y_{MODELO} \\ Z_i - Z_{MODELO} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

5.3.5 Classificação de pontos estáveis

Por fim, para que o ponto seja classificado como robusto ou não, um limiar (δ), obtido em função das componentes da elipse de confiança dos parâmetros, ou, de um padrão imposto. Esta quantidade trata-se de uma medida de acurácia local. Para este trabalho, a imposição do limiar foi feita baseado na acurácia média obtida nos processamentos PPP do software GAPS. O qual foi considerado 1 cm de desvio padrão para cada componente cartesiana (X, Y, Z). Assim, classificam-se os pontos da seguinte maneira:

$$D_i < \delta_i \quad (5.9)$$

Se o ponto for robusto, pode-se dizer que o movimento local obtido, (δ_{ML}), não contém erros grosseiros ou sistemáticos que não foram detectados, portanto o ponto somente contém deslocamentos físicos, sendo estes, de interesse na modelagem de de-

formações. Uma vez que os dados estão livres de quaisquer tipos de erros, se torna trivial analisar a estabilidade dos mesmos.

Caso contrário, se o ponto for classificado como não robusto, significa que existem pequenos erros nas observações que influenciarão nas análises. Estes erros devem ser identificados e removidos das observações para que posteriormente possa-se realizar análises sobre sua estabilidade.

Baseado no modelo proposto, a definição ou escolha dos pontos estáveis será baseada nos menores eventos de instabilidades locais, ou seja, com menores eventos de não robustez nos resultados, em função da quantidade relativa dos resultados disponíveis para cada estação. E por fim, a definição será dada pela seguinte equação:

$$\text{Se : } R = \sum_i \frac{\text{Robustez}_i}{n} \begin{cases} \geq 50\%, & \text{é estável,} \\ < 50\%, & \text{não é estável.} \end{cases} \quad (5.10)$$

onde:

i é a variação do primeiro ao último ano; e

n é a quantidade de anos com dados;

6 Resultados e análises

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos e as análises. As seções seguintes mostrarão os valores parciais obtidos nos processamentos, as séries temporais obtidas das duas técnicas, PPP e o modelo, a análise de robustez do modelo matemático proposto e a escolha dos pontos estáveis.

6.1 Resultados parciais dos processamento

O processamento dos dados no *software* GAPS foi realizado para todas as estações, conforme a disponibilidade de dados, Tabela 5.1. Para cada arquivo RINEX diário é gerado uma solução, também diária, contendo a estimativa dos parâmetros.

Na Tabela 6.1, segue um resumo dos processamentos. Para cada estação, apresentam-se os anos processados e os anos com problemas nos processamentos.

Tabela 6.1: Processamento dos dados

Estação	Braz	Fort/Brft	Mana/Naus	Impz	Chpi	Imbt	Recf	Cuib
Ano	Quantidade de arquivos processados (%)							
01	79,4	63,8	17,5	78,1	-	-	93,4	92,0
02	96,7	63,8	43,8	60	-	-	94,2	86,3
03	96,7	85,5	49,8	78,6	-	-	77,3	89,6
04	99,7	80,5	-/-	82,4	-	-	93,4	95,6
05	92,9	75,0	-	61,4	-	-	84,4	93,7
06	86,0	24,4/97	95,1	76,7	-	-	60,5	97,3
07	-	94,7	51,2	-	88,7	32,1	-	55,9
08	91,8	95,8	100	99,2	96,2	84,4	91,5	99,7
09	83,0	94,2	98,1	96,4	97	83,4	90,9	98,9
10	92,0	63,6	92,3	92,3	92,0	92,3	91,2	92,0
11	90,7	83,8	82,7	92,3	91,2	71,8	84,4	91,8

No geral, obteve-se um bom aproveitamento nos processamentos, porém, algumas

falhas ocorreram. A frequência maior de erros ocorreram do início das séries, em 2001 até 2007, o qual neste último, três das estações não obtiveram nenhuma solução nos processamentos, outras três tiveram menos de 55% de dados processados e as duas melhores com 99,7% e 88,7% de dados processados. A razão das falhas não se sabe ao certo, mas as prováveis causas podem estar associadas ao arquivos RINEX. Por exemplo, cabeçalho com erros, arquivos corrompidos e arquivos sem muitas observações.

6.2 Séries temporais PPP e modelo VEMOS2009

Com os arquivos de saída dos processamentos no GAPS, *.par e *.srt, extraíram-se as coordenadas e o respectivo desvio padrão das estações.

Para cada ano, armazenaram-se todos os arquivos diários *.par e *.std em um diretório, e utilizando das rotinas em Matlab, extraíram-se as últimas estimativa de cada arquivo de solução diária e armazenaram-as nos arquivos *.totalpar e *.totalstd.

Com a solução das coordenadas de um ano completo, para gerar a série temporal pelo PPP resta apenas inserir neste arquivo, o *.totalpar, os desvios-padrão de cada dia de solução, obtidos do arquivo *.totalstd, criando-se o arquivo de entrada para as análises.

Como detalhado na subseção 5.3, para a obtenção das séries temporais pelo modelo utilizou-se, inicialmente, coordenadas da solução SIRGAS2000 para as estações, Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Solução SIRGAS2000, época 2000,4

Estações	$X(m)$	$Y(m)$	$Z(m)$
Braz	4115014,085	-4550641,549	-1741444,019
Cuib	3430711,406	-5099641,565	-1699432,931
Fort	4985386,605	-3954998,594	-428426,440
Brft	4985393,539	-3954993,411	-428426,773
Impz	4289656,441	-4680884,944	-606347,331
Mana	3179009,359	-5518662,100	-344401,823
Naus	3179409,376	-5519130,673	-334110,163
Recf	5176588,653	-3618162,163	-887363,920
Chpi	4164613,872	-4162456,858	-2445028,859
Imbt	3714771,559	-4221851,099	-2999473,942

Posteriormente, realizou-se uma transformação entre os referenciais da Solução SIRGAS2000 (ITRF2000), para o mesmo referencial de saída das soluções GAPS (ITRF2005). Com base nestas coordenadas, transformou-se as mesmas para coordena-

das curvilíneas, para entrada no modelo de velocidades. Assim, seguem as velocidades obtidas pelo VEMOS2009, Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Velocidades interpoladas do VEMOS2009 (ITRF2005)

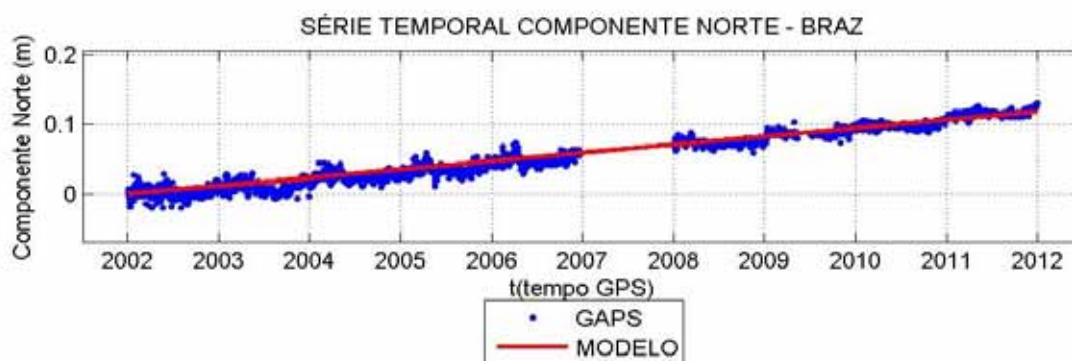
Estações	$V_{lat}(m/a)$	$V_{long}(m/a)$	$V_X(m/a)$	$V_Y(m/a)$	$V_Z(m/a)$
Braz	0,0123	-0,0037	-0,0005	-0,0050	0,0119
Cuib	0,0120	-0,0035	-0,0011	-0,0046	0,0115
Fort	0,0118	-0,0036	-0,0016	-0,0033	0,0118
Brft	0,0118	-0,0036	-0,0016	-0,0033	0,0118
Impz	0,0119	-0,0041	-0,0023	-0,0036	0,0119
Mana	0,0112	-0,0053	-0,0043	-0,0032	0,0112
Naus	0,0112	-0,0054	-0,0044	-0,0032	0,0112
Recf	0,0117	-0,0031	-0,0004	-0,0035	0,0116
Chpi	0,0117	-0,0034	0,0008	-0,0056	0,0108
Imbt	0,0120	-0,0026	0,0018	-0,0060	0,0106

Com as coordenadas e velocidades, aplicou-se as velocidades nas coordenadas do modelo, obtendo as séries temporais para os mesmos dias de soluções GAPS, gerando um dos arquivos de entrada para as análises.

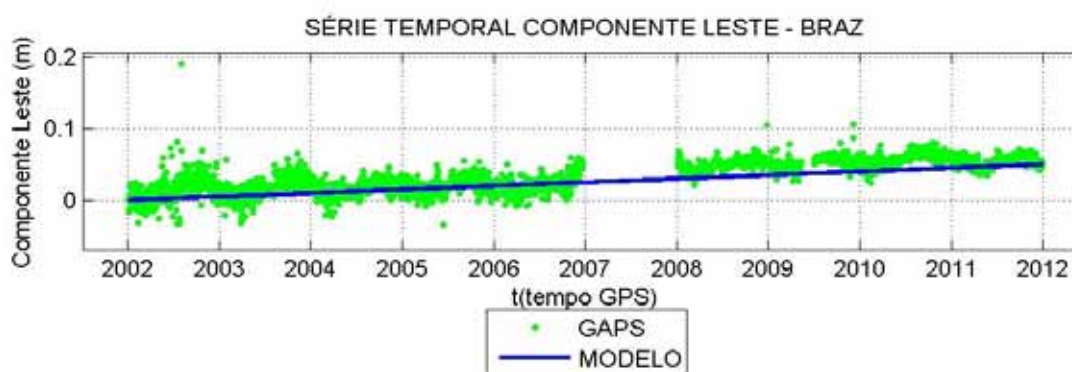
Na sequência, seguem as séries temporais completas para cada estação, comparando as diferenças de coordenadas entre as soluções do GAPS com as diferenças entre as soluções VEMOS2009, representadas em um sistema geodésico local, nas componentes locais leste, norte e vertical. As séries temporais serão apresentadas conforme os critérios adotados para a escolha das estações em 5.2:

Maiores séries temporais: BRAZ e FORT/BRFT.

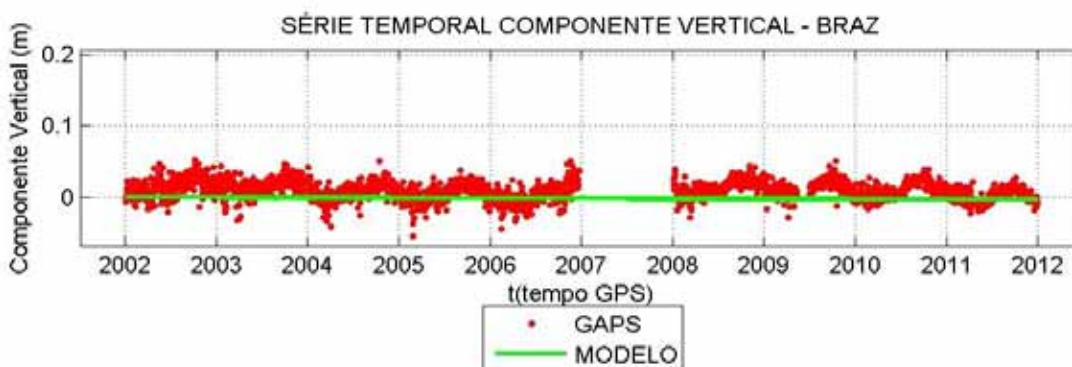
- BRAZ:



(a) Comparação da componente local norte da estação BRAZ



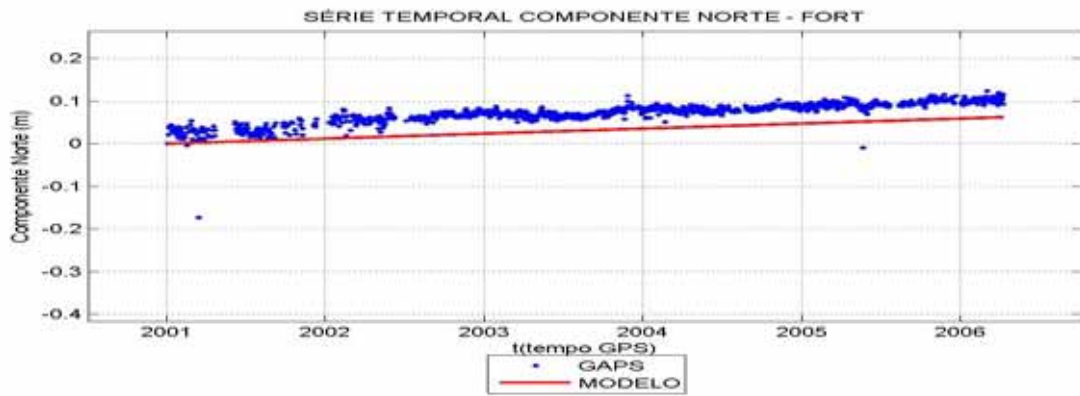
(b) Comparação da componente local leste da estação BRAZ



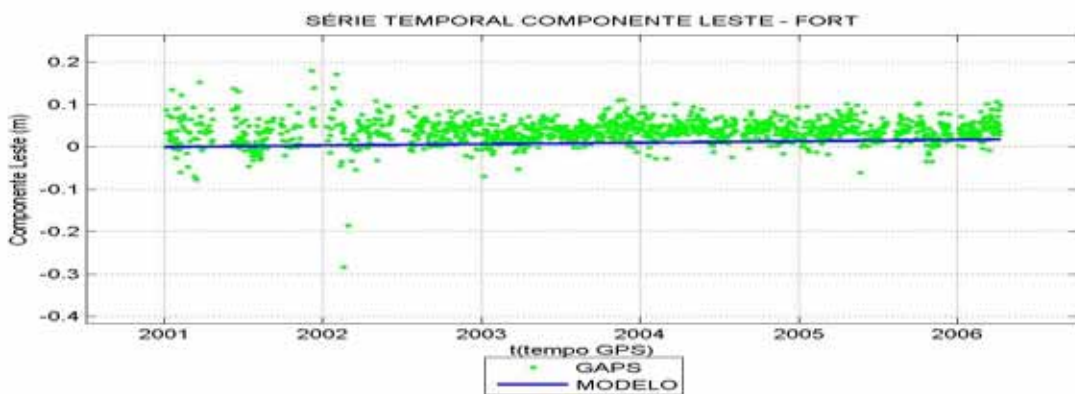
(c) Comparação da componente local vertical da estação BRAZ

Figura 6.1: Comparação PPP com o modelo para a estação BRAZ.

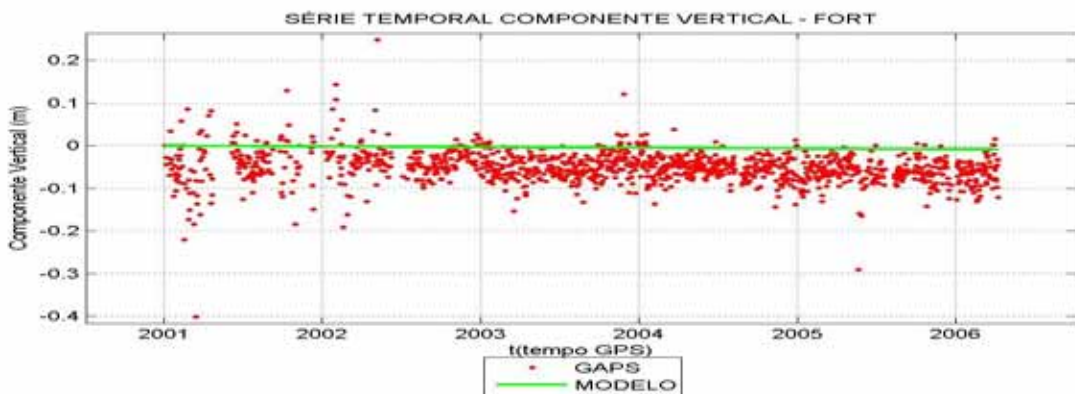
Visualmente, as três componentes das soluções PPP para a estação BRAZ acompanharam bem o modelo. O comprimento da série temporal foi de 10 anos de dados, porém com um ano sem soluções, para o ano de 2007, devido a falhas nos processamentos.



(a) Comparação da componente local norte da estação FORT



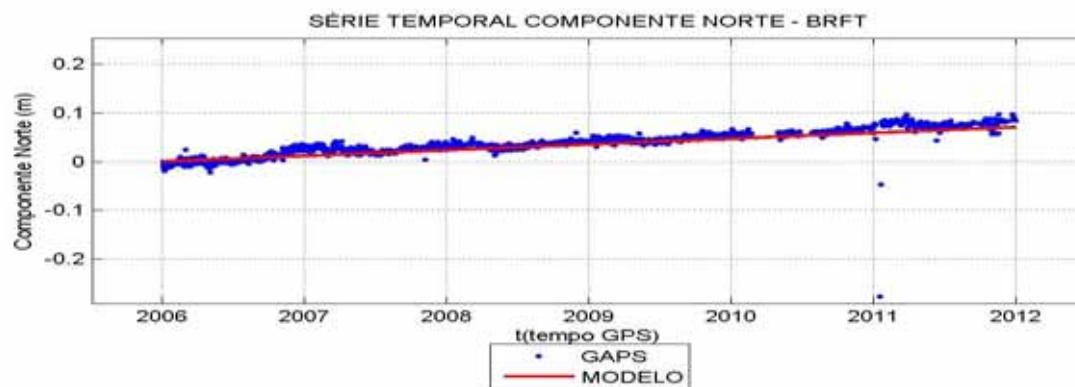
(b) Comparação da componente local leste da estação FORT



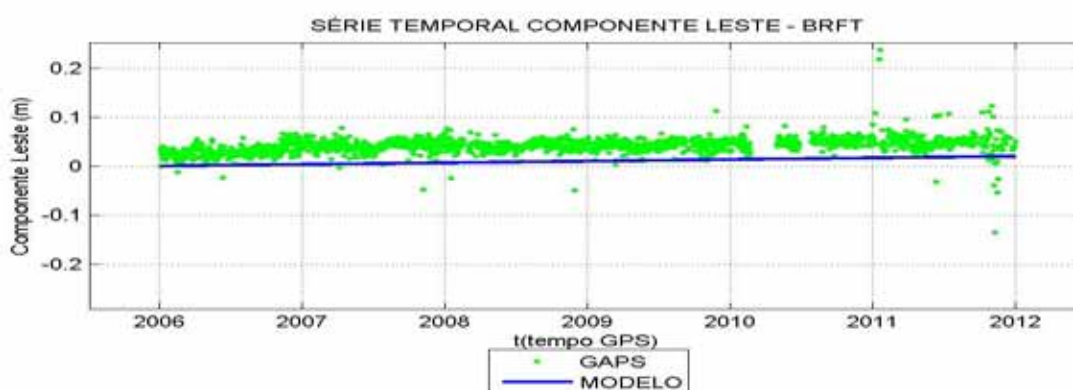
(c) Comparação da componente local vertical da estação FORT

Figura 6.2: Comparação PPP com o modelo para a estação FORT.

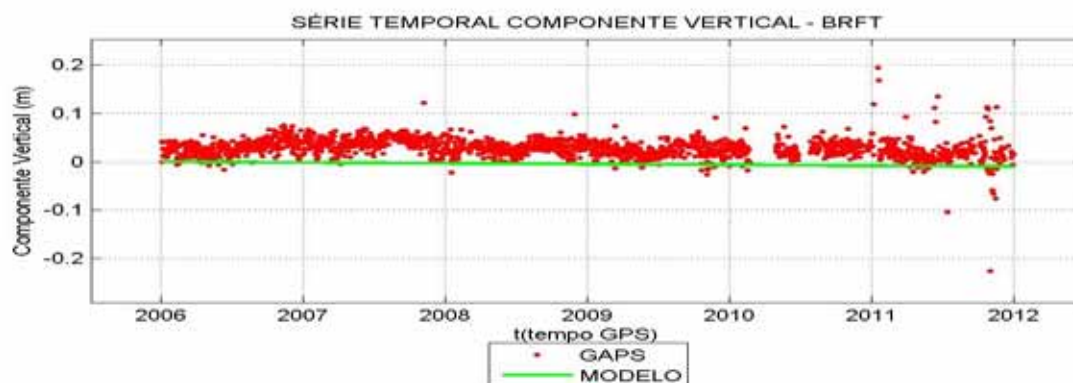
Para a estação FORT, pode-se inferir visualmente, que as três componentes das soluções PPP têm um pequeno desvio com relação ao modelo. Na componente norte, este desvio, ou deslocamento, é melhor percebido, enquanto nas componentes leste e vertical o deslocamento é menor. Para esta estação, o comprimento da série temporal foi de 5 anos e 4 meses de dados. Nos anos de 2001 até o início de 2002 as soluções GAPS foram ruidosas, principalmente nas componentes leste e vertical.



(a) Comparação da componente local norte da estação BRFT



(b) Comparação da componente local leste da estação BRFT

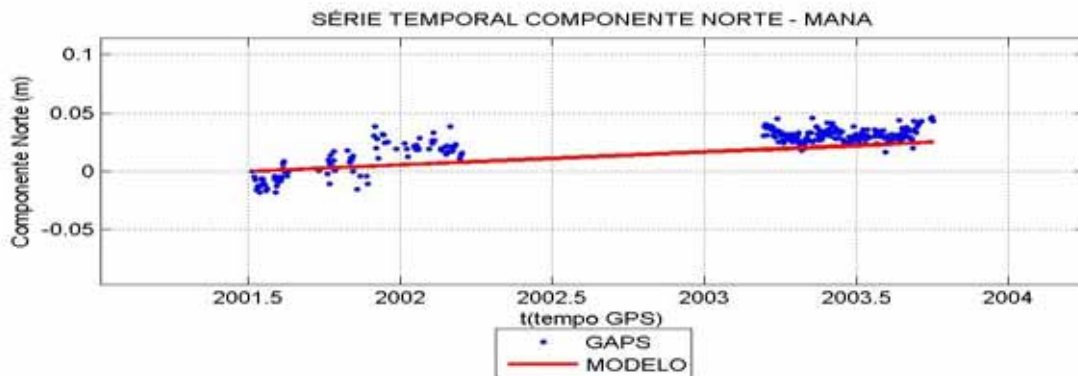


(c) Comparação da componente local vertical da estação BRFT

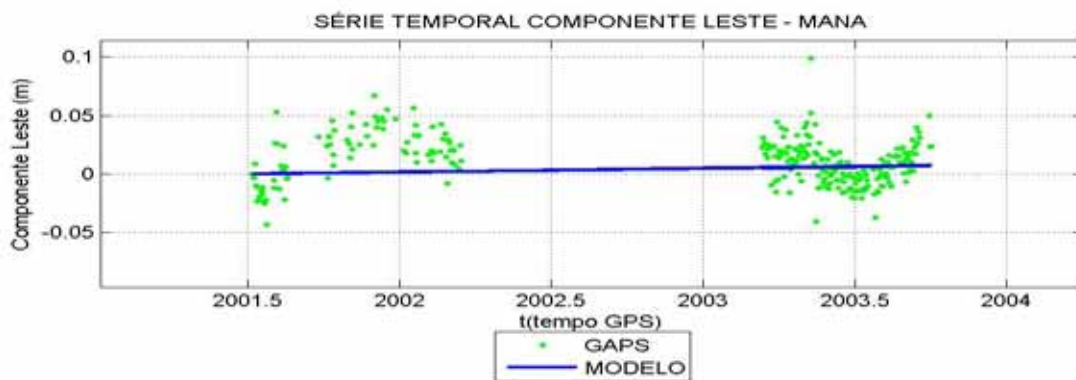
Figura 6.3: Comparação PPP com o modelo para a estação BRFT.

A estação FORT foi substituída pela estação BRFT. Com esta substituição inicia-se outra série temporal de 2006 até final de 2011, ou seja, 6 anos de dados. Nesta nova série PPP e modelo, percebe-se que a componente norte acompanhou o modelo, já nas componentes leste e vertical, o desvio para com o modelo continuou. As três componentes diminuíram os ruídos nas estimativas, sendo mais perceptíveis nas componentes leste e vertical.

Variações temporais conhecidas: MANA/NAUS e IMPZ



(a) Comparação da componente local norte da estação MANA



(b) Comparação da componente local leste da estação MANA

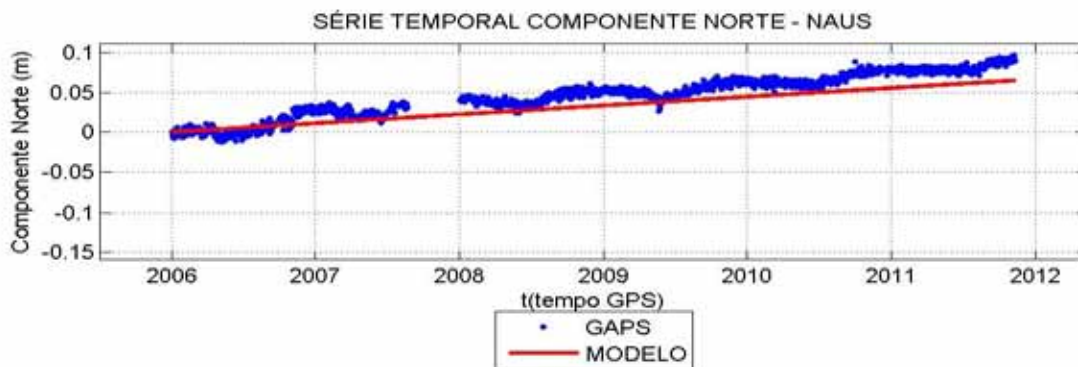


(c) Comparação da componente local vertical da estação MANA

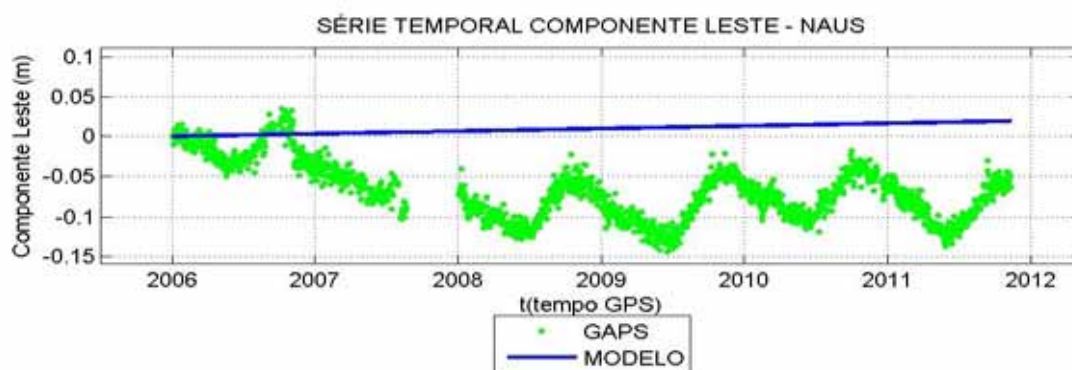
Figura 6.4: Comparação PPP com o modelo para a estação MANA.

Para a estação MANA não foi possível inferir sobre o comportamento das componentes devido à falta de dados e falha nos processamentos.

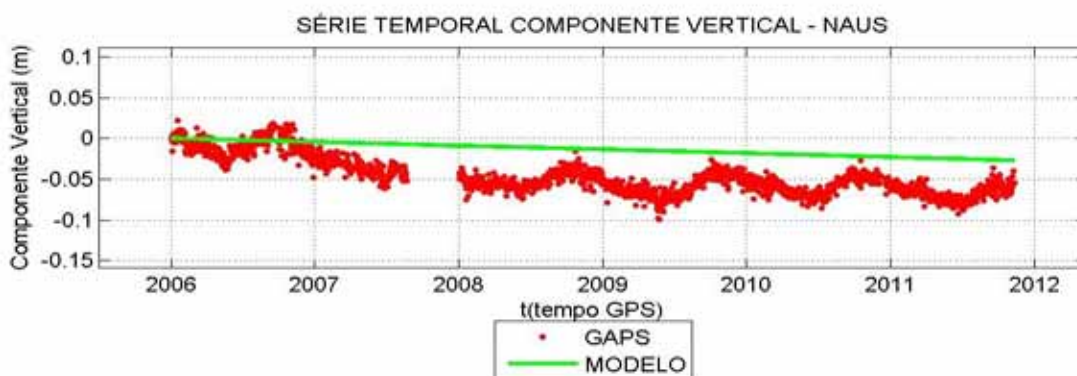
- NAUS:



(a) Comparação da componente local norte da estação NAUS



(b) Comparação da componente local leste da estação NAUS



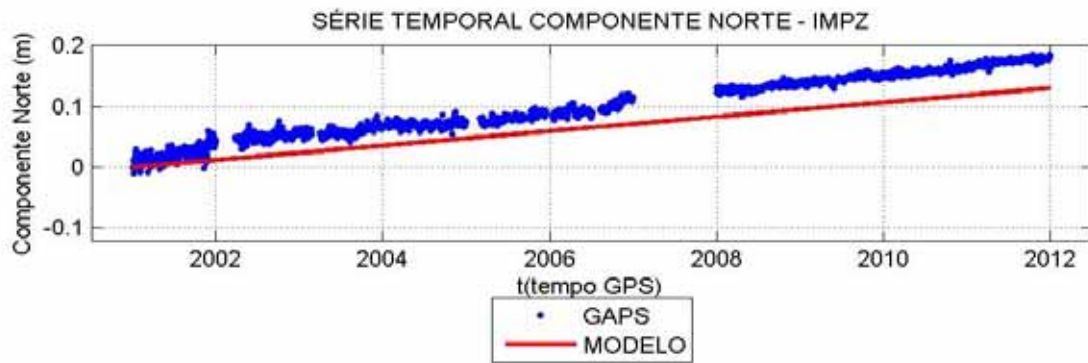
(c) Comparação da componente local vertical da estação NAUS

Figura 6.5: Comparação PPP com o modelo para a estação NAUS.

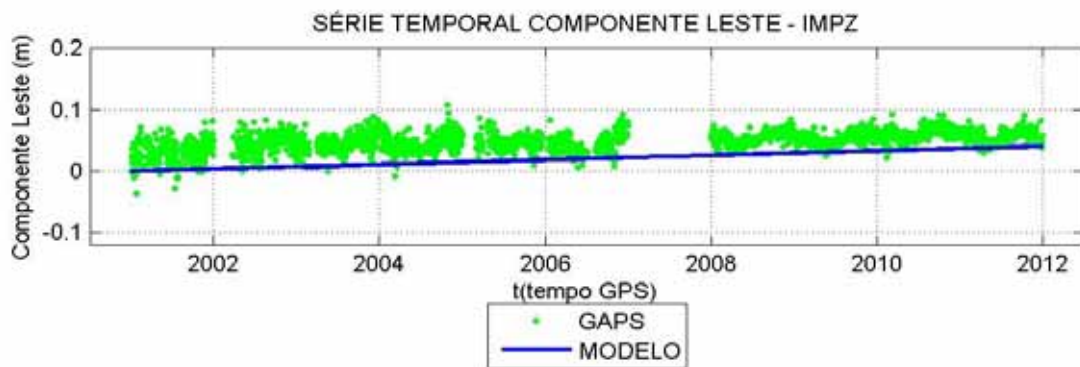
Para suprir a desativação de MANA, instalou-se na região a estação NAUS. A sua série para análises foi desde a sua ativação, em 2006, até em final de 2011, apenas com uma falha no final de 2007. A componente norte foi a que melhor acompanhou o modelo. A componente vertical se deslocou menos que a componente leste, a qual

a última se afastou mais do modelo dentre as três. É evidente a sazonalidade nas três componentes, onde o efeito é mais contundente nas componentes leste e vertical, fazendo-as variarem por volta de 10 e 7 centímetros, respectivamente.

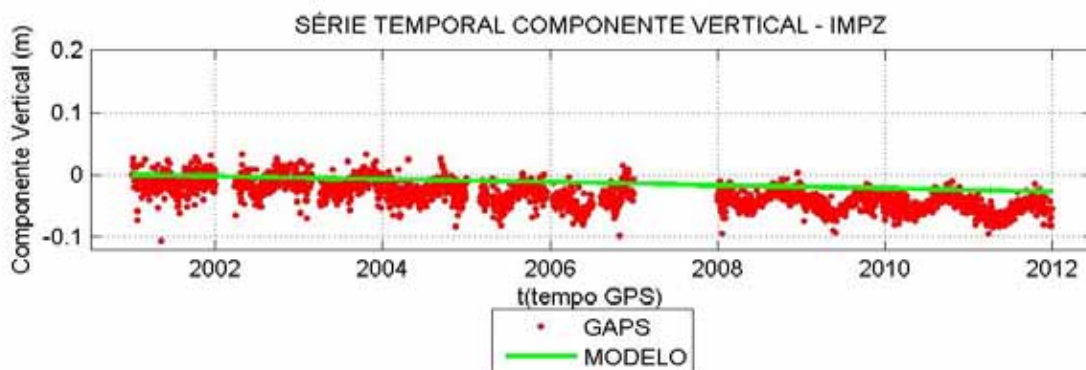
- IMPZ:



(a) Comparação da componente local norte da estação IMPZ



(b) Comparação da componente local leste da estação IMPZ



(c) Comparação da componente local vertical da estação IMPZ

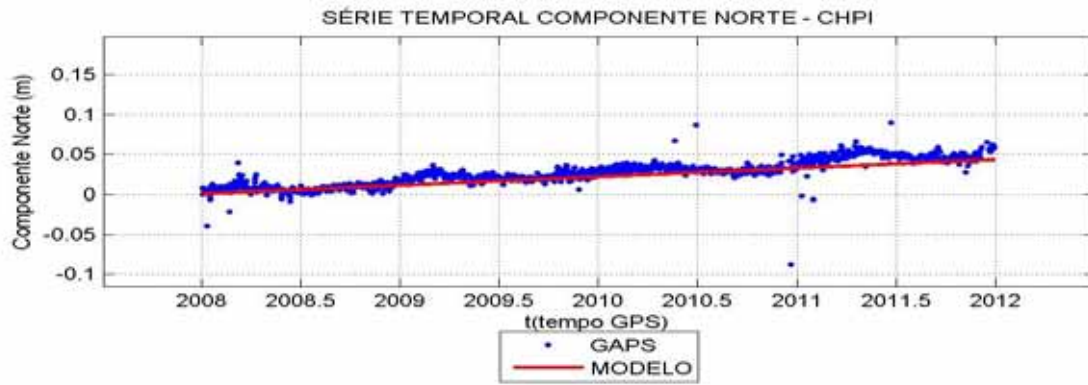
Figura 6.6: Comparação PPP com o modelo para a estação IMPZ.

A série temporal para a estação IMPZ tem uma abrangência de 11 anos de dados,

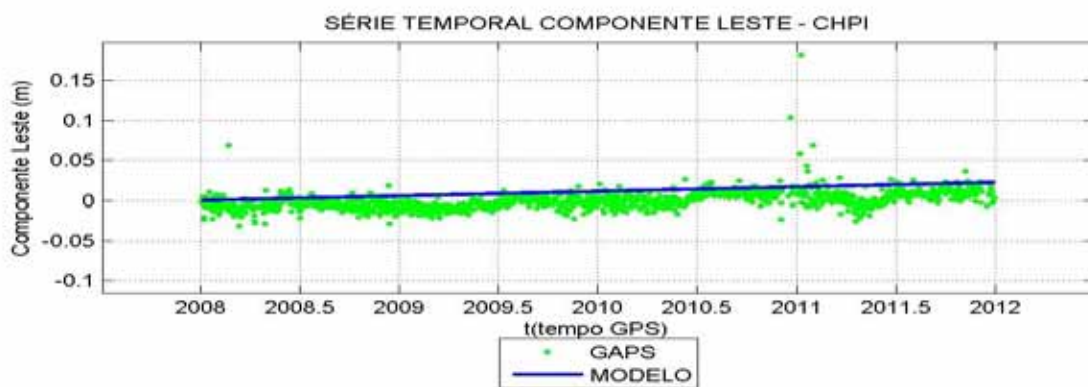
de 2001 até o fim de 2011. As três componentes acompanham o modelo porém com um afastamento, no qual na componente norte é mais nítido. As componentes leste e vertical apresentaram posições pelo PPP ruidosas e também apresentaram uma sazonalidade, mais nítidas de 2008 em diante.

Estações com reconhecido histórico sem variações temporais: CHPI

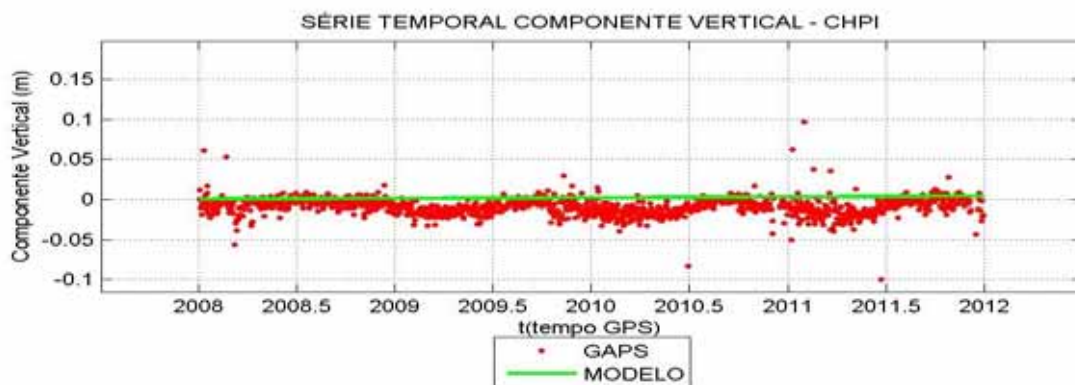
- CHPI:



(a) Comparação da componente local norte da estação CHPI



(b) Comparação da componente local leste da estação CHPI



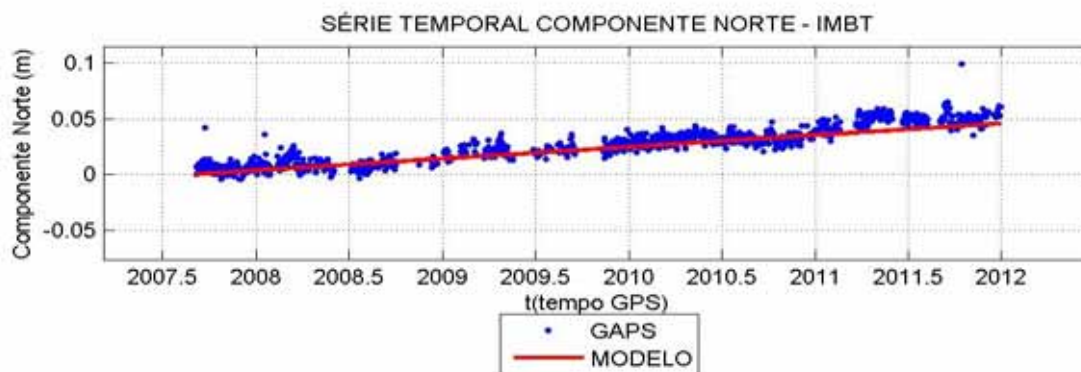
(c) Comparação da componente local vertical da estação CHPI

Figura 6.7: Comparação PPP com o modelo para a estação CHPI.

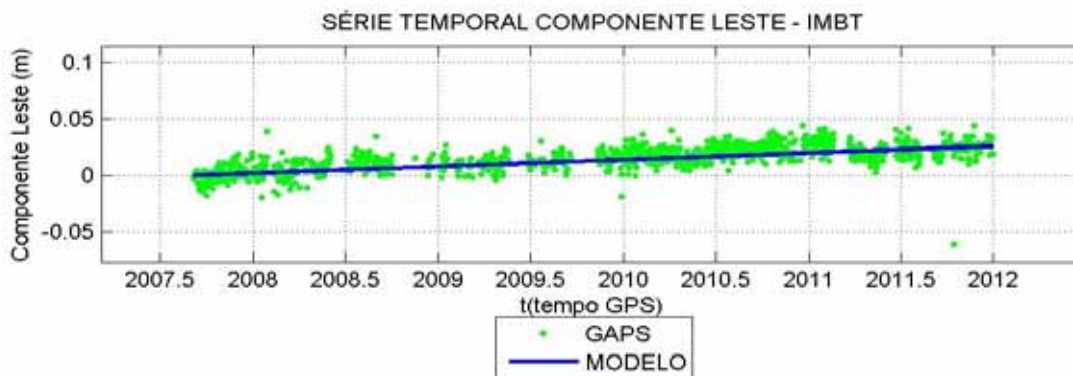
A disponibilidade de dados da estação CHPI foi do início de 2008 até final de 2011. No geral, as três componentes acompanham bem o modelo, somente as componentes leste e vertical desviaram minimamente do modelo. Infere-se que as três componentes apresentam uma sazonalidade, sendo esta mais visível na componente vertical.

Estações litorâneas: IMBT e RECF

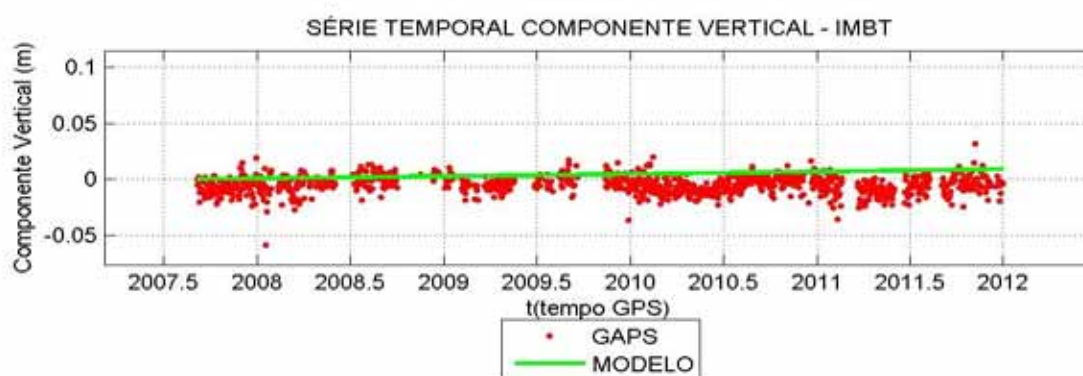
- IMBT:



(a) Comparação da componente local norte da estação IMBT



(b) Comparação da componente local leste da estação IMBT



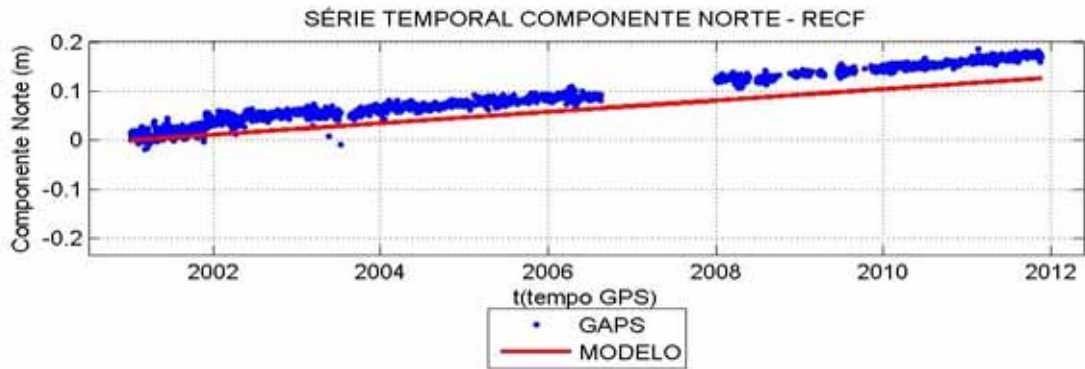
(c) Comparação da componente local vertical da estação IMBT

Figura 6.8: Comparação PPP com o modelo para a estação IMBT.

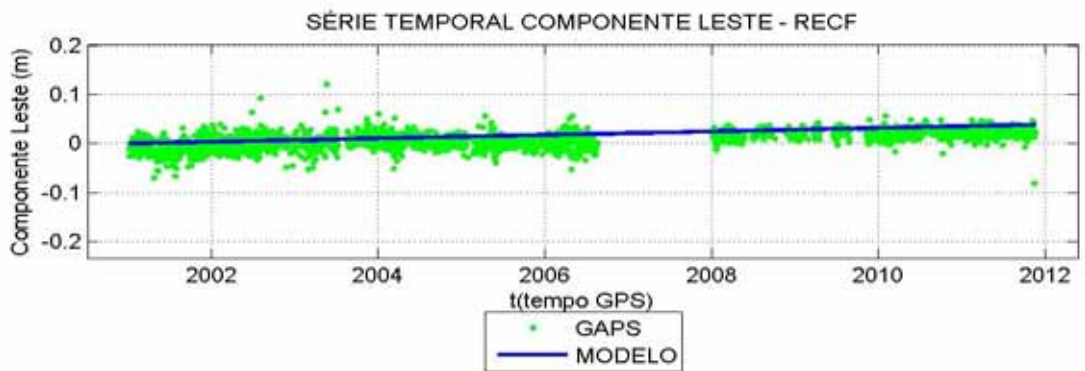
Com uma série de 3 anos e 3 meses, de Setembro de 2007 até final de 2011, a estação IMBT apresentou falhas nos dados e também de processamentos. Sobre os comportamentos das séries, no geral, todas acompanharam bem o modelo. Visualmente, as três

componentes não mostraram nenhuma sazonalidade predominante, mostrando serem quase constantes em relação ao modelo.

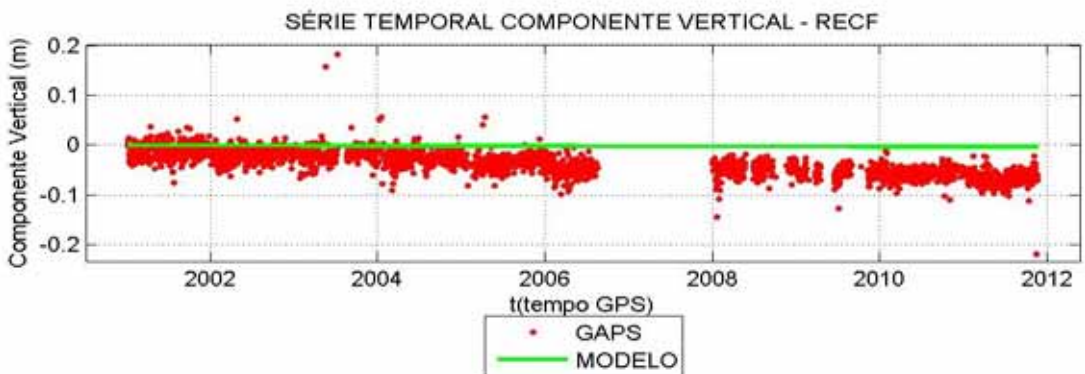
- RECF:



(a) Comparação da componente local norte da estação RECF



(b) Comparação da componente local leste da estação RECF



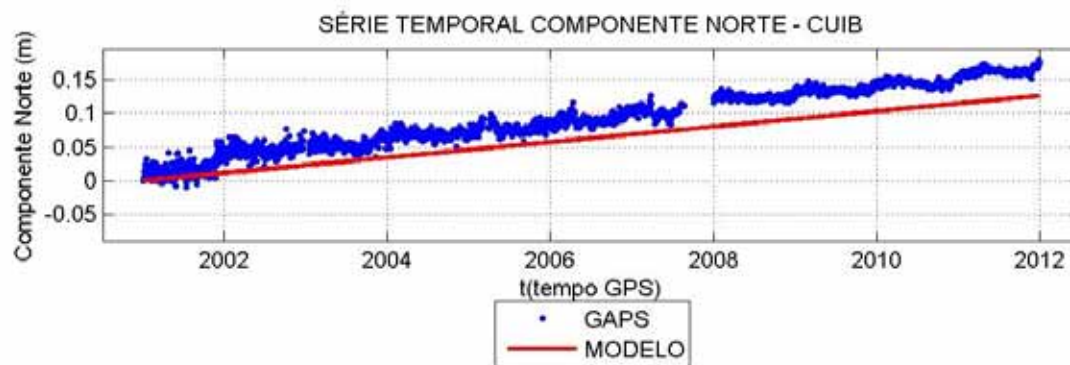
(c) Comparação da componente local vertical da estação RECF

Figura 6.9: Comparação PPP com o modelo para a estação RECF.

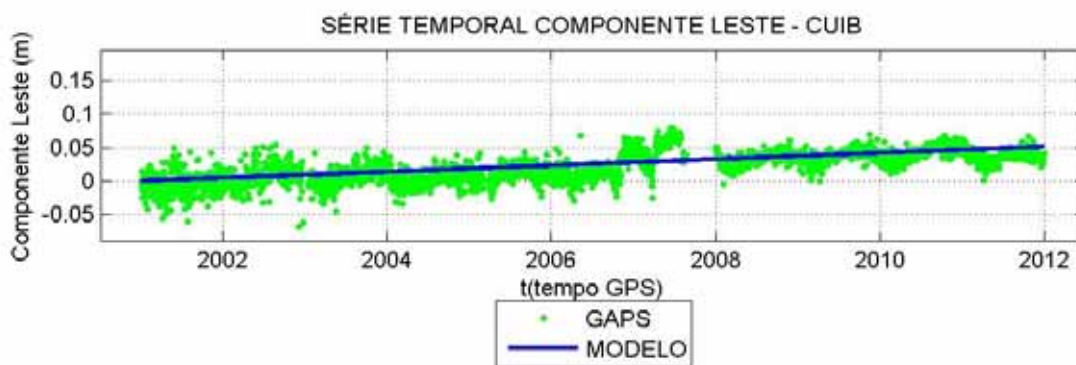
RECF apresenta uma série com 11 anos de dados, de 2001 até o final de 2011. As componentes apresentam um comportamento aparentemente constante. A componente

leste mostrou um melhor acompanhamento do modelo durante toda a série. A vertical, inicia acompanhando o modelo, porém, a partir de 2006 começa a se distanciar. Já a componente norte mostra um distanciamento constante do início ao fim da série.

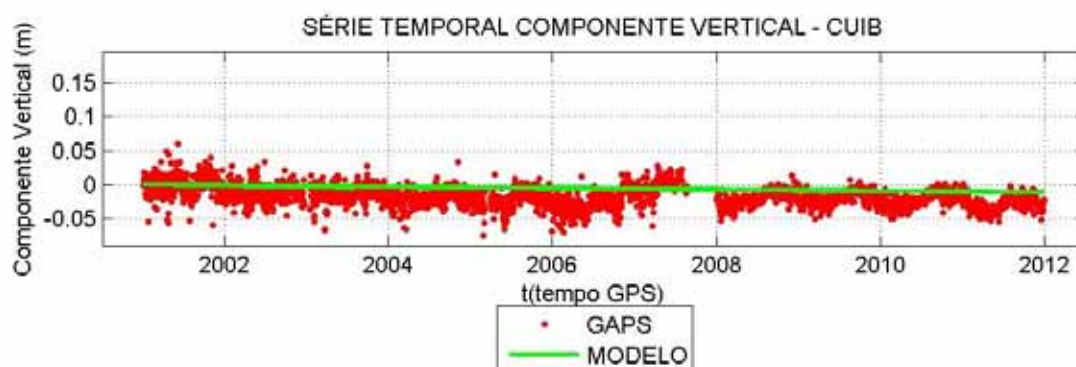
Estações no interior: CUIB



(a) Comparação da componente local norte da estação CUIB



(b) Comparação da componente local leste da estação CUIB



(c) Comparação da componente local vertical da estação CUIB

Figura 6.10: Comparação PPP com o modelo para a estação CUIB.

Também com uma série completa, de 2001 a 2011, CUIB teve 11 anos de dados para

análises. A série se mostra ruidosa para todas as componentes de 2001 a 2007. Após este período, observa-se melhor o comportamento das componentes. Todas as componentes apresentam uma sazonalidade nos dados. A componente norte tem um deslocamento constante do modelo, já as componentes vertical e leste melhor acompanham o modelo, sendo leste melhor que a vertical.

Na Tabela 6.4, seguem o deslocamento de cada componente em cada estação obtidos entre o início e fim das soluções.

Tabela 6.4: Deslocamentos e velocidades das estações.

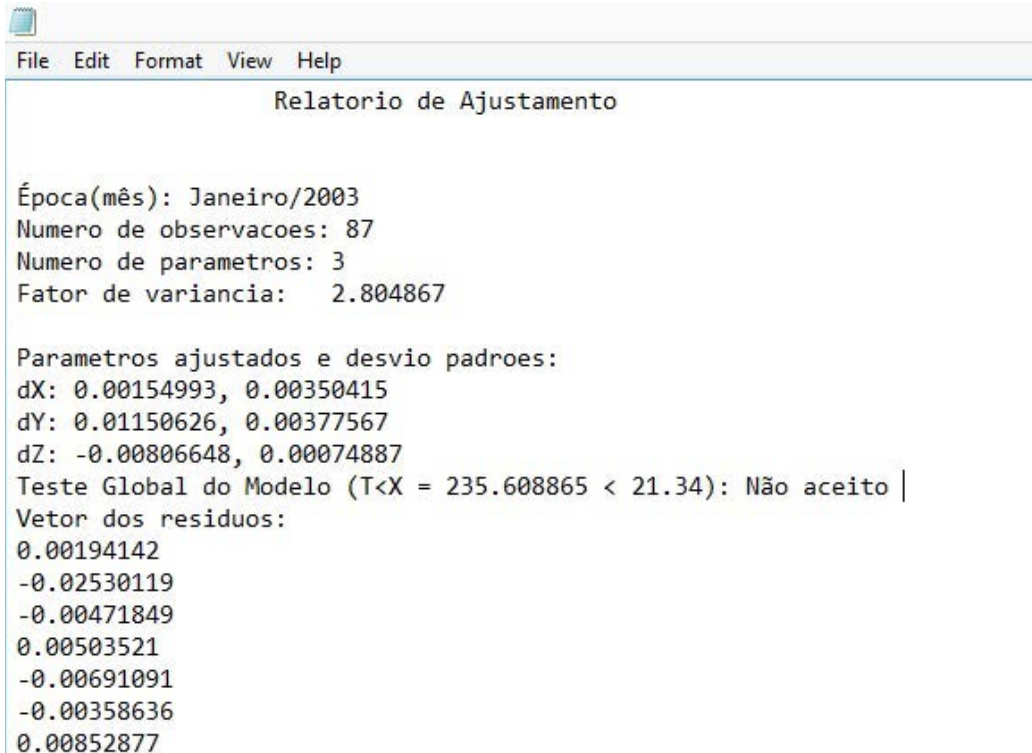
Estações	Deslocamentos (cm) e velocidades (cm/ano)			Extensão temporal (anos)
	norte	leste	vertical	
BRAZ	0,87	4,93	-13,10	10
	0,10	0,50	1,31	
FORT	3,13	3,59	-11,59	5,3
	0,60	0,70	2,20	
BRFT	-1,25	5,07	-8,37	6
	0,21	0,85	1,39	
MANA	2,65	2,31	-4,37	2,5
	1,06	0,93	1,75	
NAUS	5,32	-6,04	-9,24	6
	0,89	1,01	1,54	
IMPZ	4,93	5,61	-18,59	11
	0,45	0,51	1,70	
CHPI	1,79	0,31	-5,90	4
	0,45	0,10	1,47	
IMBT	0,45	1,91	-6,05	3,25
	0,14	0,59	1,86	
RECF	5,20	2,10	-17,61	11
	0,47	0,19	1,60	
CUIB	2,03	4,09	-17,55	11
	0,18	0,37	1,60	

Com esta tabela tem-se uma noção do campo de velocidade das estações durante a série temporal analisada. Os valores foram obtidos da diferença entre a primeira e última solução de coordenada de cada estação. Verifica-se que os valores em cada componente tem uma mesma “direção”, ou seja, seguindo o campo de velocidade da placa Sul Americana. Porém, algumas componentes, a norte da estação BRFT e leste da estação NAUS, tiveram valores contrários as demais. Como dito anteriormente,

os valores foram obtidos simplesmente da diferença da primeira e última estimativa, podendo estes valores estarem com algum tipo de erro, o qual sua estimativa.

6.3 Análise de robustez

De posse dos arquivos contendo as séries temporais pelo GAPS e o modelo de velocidades, a rotina principal estará completa para ser executada. Esta rotina prepara algumas quantidades, as quais serão entradas em outras funções. A primeira função chamada é a que realiza o ajustamento e testes estatísticos do modelo. Nesta rotina, ajusta-se o modelo descrito em 5.3.4, para cada estação mensalmente, gerando um relatório de ajustamento contendo informações tais como: parâmetros ajustados e respectivos desvios-padrões, Teste Global do Modelo, testes estatísticos para detecção de erros, resíduos e outros. Na Figura 6.11, segue o início do relatório.



```
File Edit Format View Help
Relatorio de Ajustamento

Época(mês): Janeiro/2003
Numero de observacoes: 87
Numero de parametros: 3
Fator de variancia: 2.804867

Parametros ajustados e desvio padroes:
dX: 0.00154993, 0.00350415
dY: 0.01150626, 0.00377567
dZ: -0.00806648, 0.00074887
Teste Global do Modelo (T<X = 235.608865 < 21.34): Não aceito |
Vetor dos residuos:
0.00194142
-0.02530119
-0.00471849
0.00503521
-0.00691091
-0.00358636
0.00852877
```

Figura 6.11: Parte do relatório de ajuste.

Com as quantidades obtidas do ajustamento do modelo, o próximo passo é realizar a *análise de confiabilidade*. Uma rotina específica para esta análise determina as confiabilidades interna e externa, mensalmente. Estas quantidades são os dados de entrada para a análise geométrica de deformações. A rotina da análise geométrica de deformações determina o deslocamento mensal, causados pelos parâmetros de deformação obtidos em função dos deslocamentos causados pelas confiabilidades, conforme detalhado em 4.3. Como resultado, na Figura 6.12, segue o arquivo de saída destas etapas, confiabilidades e análise geométrica de deformação.


```
2003_Deslocamento_AGD_e_AC - Notepad
File Edit Format View Help
Deslocamento obtido pelas Analises Geometrica de Deformacoes e Confiabilidades
Época(mês): Janeiro/2003
Condicoes iniciais:
4289656.43310135
-4680884.95084853
-606347.29348565
Deslocamento nas tres componentes:
0.04651443
0.05012627
0.00991474
Deslocamento resultante:
0.06909803
Deslocamento obtido pelas Analises Geometrica de Deformacoes e Confiabilidades
Época(mês): Fevereiro/2003
Condicoes iniciais:
4289656.43293529
-4680884.95110847
-606347.29262643
Deslocamento nas tres componentes:
0.05174863
0.05261894
0.01037359
Deslocamento resultante:
0.07452708
Deslocamento obtido pelas Analises Geometrica de Deformacoes e Confiabilidades
Época(mês): Abril/2003
Condicoes iniciais:
4289656.43253934
-4680884.95172820
-606347.29057785
Deslocamento nas tres componentes:
0.04421630
0.04508764
0.00914335
Deslocamento resultante:
0.06380892
Deslocamento obtido pelas Analises Geometrica de Deformacoes e Confiabilidades
Época(mês): Maio/2003
Condicoes iniciais:
4289656.43234716
-4680884.95202901
```

Figura 6.12: Arquivo de saída para as análises de confiabilidades e geométrica de deformações.

Como mencionado na subseção 4.4, para realizar a análise de robustez, limiares são necessários para classificar a estação. Estes limiares são obtidos em função da MVC das coordenadas pelo desenho da elipse de confiança da posição da estação. Se o deslocamento for menor que o limiar o ponto é robusto, caso contrário, a estação não é robusta.

Na sequência, segue um trecho do arquivo de saída para a análise de robustez da estação IMPZ, no ano de 2011.


```

2011_Analise_da_Robustez.txt
File Edit Format View Help
Analise da Robustez:
Se D<ld e robusto, portanto: Robusto
=====

Relatorio da Analise de Robustez

Época(mês): Setembro/2011
Deslocamento em funcao da AC e AGD (D): 0.04612714
Valor Limite (ld): 0.04849742

Analise da Robustez:
Se D<ld e robusto, portanto: Robusto
=====

Relatorio da Analise de Robustez

Época(mês): Outubro/2011
Deslocamento em funcao da AC e AGD (D): 0.04996151
Valor Limite (ld): 0.04849742

Analise da Robustez:
Se D<ld e robusto, portanto: Nao robusto
=====

Relatorio da Analise de Robustez

Época(mês): Novembro/2011
Deslocamento em funcao da AC e AGD (D): 0.05158800
Valor Limite (ld): 0.04849742

Analise da Robustez:
Se D<ld e robusto, portanto: Nao robusto
=====

```

Figura 6.13: Arquivo de saída para a análise de robustez.

6.4 Análises e definição dos pontos estáveis

Assim como mencionado em 5.3.5, a definição ou escolha dos pontos estáveis será baseada nos menores eventos de instabilidades locais, ou seja, com menores eventos de não robustez nos resultados, em função da quantidade relativa dos resultados disponíveis para cada estação. De maneira trivial, a definição será dada pela seguinte equação:

Apresentam-se, nas tabelas 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 os resultados da robustez para todos os anos de cada estação, bem como gráficos representado séries temporais do parâmetro ajustado e seus desvio-padrão, a robustez e o limiar, seguido das análises.

Tabela 6.5: Análise de Robustez estação BRAZ

Anos	Meses												Robustez em %	
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ		
2002	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Não Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Não Robusto	16,67%	
2003	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Não Robusto	8,33%	
2004	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%	
2005	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%	
2006	Robusto	Não Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Não Robusto	Não Robusto	18,18%	
2007	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	-	
2008	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	100%	
2009	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Robusto	91,67%	
2010	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Robusto	Não Robusto	83,33%	
2011	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	75%	
Legenda: Robusto												Não Robusto	$R =$	49,15

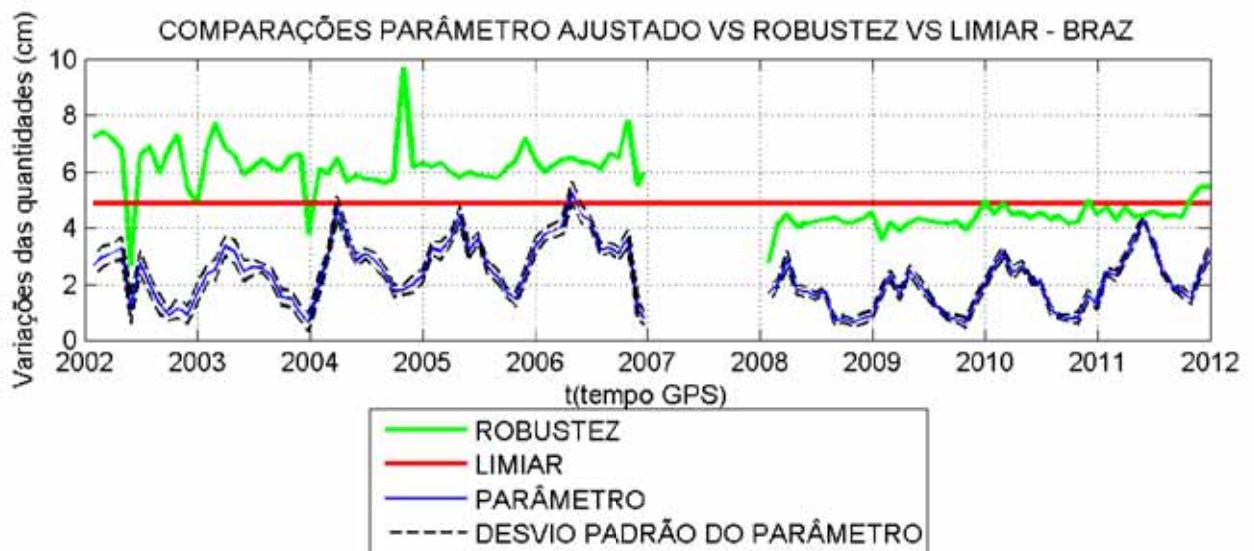


Figura 6.14: Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - BRAZ

A análise de robustez da estação BRAZ apresenta uma divisão nos resultados. Do início das análises, em 2002 até Outubro de 2006, foram praticamente classificados como não robusto. Após 2007, já se tem o contrário, durante quase todos os anos a estação foi robusta.

Na Figura 6.14, ratifica-se o ocorrido na Tabela 6.5, porém verifica-se que a robustez está correlacionada com o desvio padrão do parâmetro, ou seja, desvios-padrão maiores a estação é classificada como não robusta.

Observa-se que o parâmetro correlaciona-se com a sazonalidade das componentes da estação BRAZ, como observada na Figura 6.1.

Tabela 6.6: Análise de Robustez estação FORT/BRFT

Anos	Meses												Robustez em %
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
2001	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%
2002	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	16,67%
2003	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	8,33%
2004	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%
2005	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%
2006a	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	-	-	-	-	-	-	-	-	25%
2006b	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	91,67%
2007	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
2008	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
2009	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
2010	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	90,91%
2011	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	41,67%

Observação: FORT foi desativada no mês 04 de 2006a e BRFT ativada em 2006b

Legenda: Robusto ■ Não Robusto ■ $R =$ 47,85,

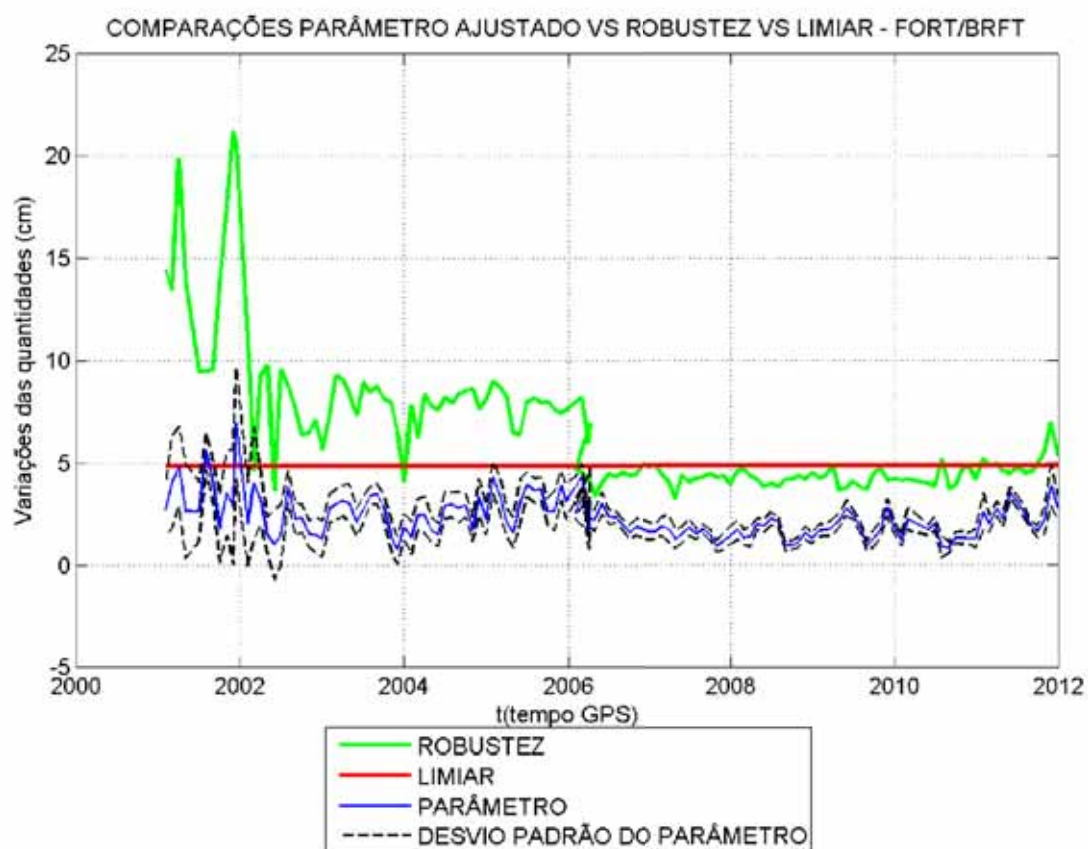


Figura 6.15: Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - FORT/BRFT

Para a estação FORT, com dados do início da série até Abril de 2006, teve-se um predomínio quase que integral de não robustez, nas classificações mensais. Após a mudança da estação para a denominada BRFT, na qual já se encontrava em funcionamento antes da desativação de FORT, no início de 2006, as classificações para robustez se invertem, sendo a estação classificada neste período, predominantemente robusta.

Analisando o gráfico das séries temporais, na Figura 6.15, observa-se um grande desvio padrão na obtenção do parâmetro na época de FORT, correlacionando-se com a robustez. Já, no período de predominância na robustez, observa-se um desvio padrão menor do que anteriormente.

Tabela 6.7: Análise de Robustez estação MANA/NAUS

Anos	Meses												Robustez em %
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
2001	■	■	—	■	■	■	—	—	—	—	—	—	0%
2002	■	■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0%
2003a	■	■	■	■	■	■	■	—	—	—	—	—	0%
2004	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2005	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2006b	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	75%
2007	■	■	■	■	■	■	■	■	■	—	—	—	0%
2008	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100%
2009	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	91,67%
2010	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	91,67%
2011	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	81,82%

Observação: MANA foi desativada no mês 12 de 2003a e NAUS ativada em 2006b

Legenda: Robusto ■ Não Robusto ■ R = 48,91

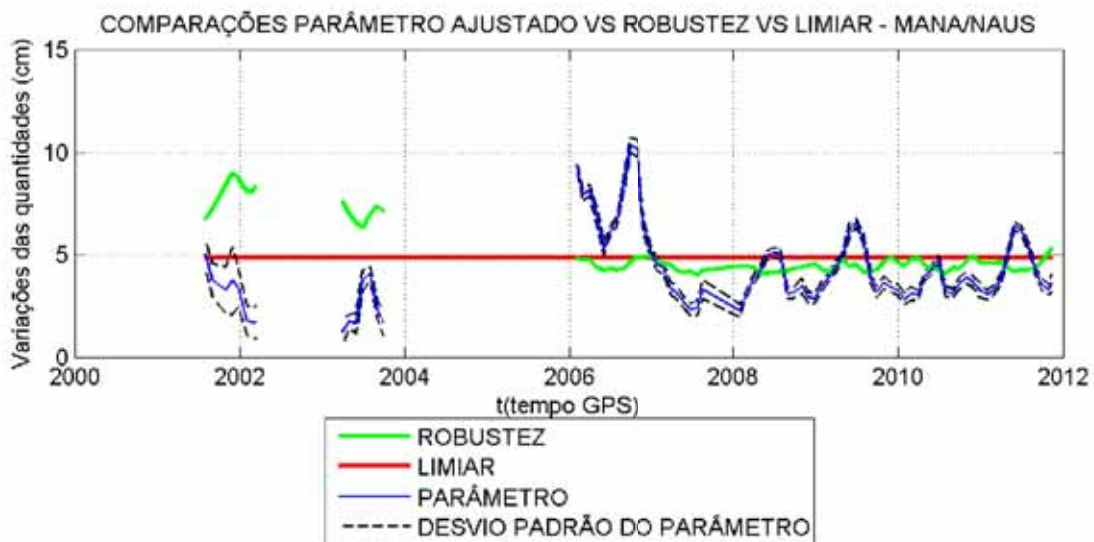


Figura 6.16: Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - MANA/NAUS

Nos anos em que MANA estava em funcionamento, até Dezembro de 2003, a classificação foi integralmente não robusta. Após a desativação e a falta de dados em 2004 e 2005, na mudança de estação em 2006, denominada NAUS, as classificações mensais foram predominantemente robustas, menos no ano de 2007, classificado como não robusto enquanto houveram dados.

Analisando a Figura 6.16, percebe-se novamente a correlação do desvio padrão na como diretamente proporcional à classificação da robustez. O parâmetro, após 2009, apresenta uma sazonalidade com picos similares no início dos anos de 2008, 2009 e 2011.

Tabela 6.8: Análise de Robustez estação IMPZ

Anos	Meses												Robustez em %
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
2001	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%
2002	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	10%
2003	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%
2004	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%
2005	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	0%
2006	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	16,67%
2007	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	-
2008	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
2009	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
2010	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
2011	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	75%
Legenda: Robusto												$R =$	40.17

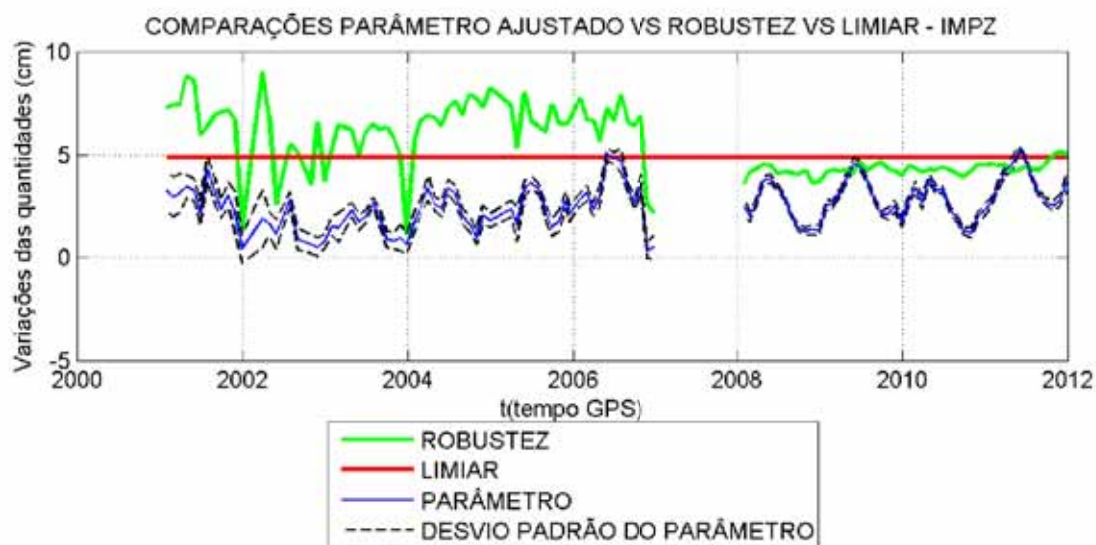




Figura 6.17: Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - IMPZ

Como visto nas estações anteriores, a estação IMPZ teve uma classificação de não robustez até novembro de 2006 e, após 2007, não houveram dados e a estação foi classificada quase integralmente como robusta.

Da mesma maneira como nos gráficos das séries temporais anteriores, o gráfico de IMPZ apresenta a mudança nítida de não robustez, do início da série até final de 2006, para robustez, de 2008 em diante. Novamente, verifica-se a correlação do desvio padrão com a robustez.

Tabela 6.9: Análise de Robustez estação CHPI

Anos	Meses												Robustez em %			
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ				
2007														100%		
2008														100%		
2009														100%		
2010														100%		
2011														91,67%		
Legenda: Robusto													Não Robusto		$R =$	78,33

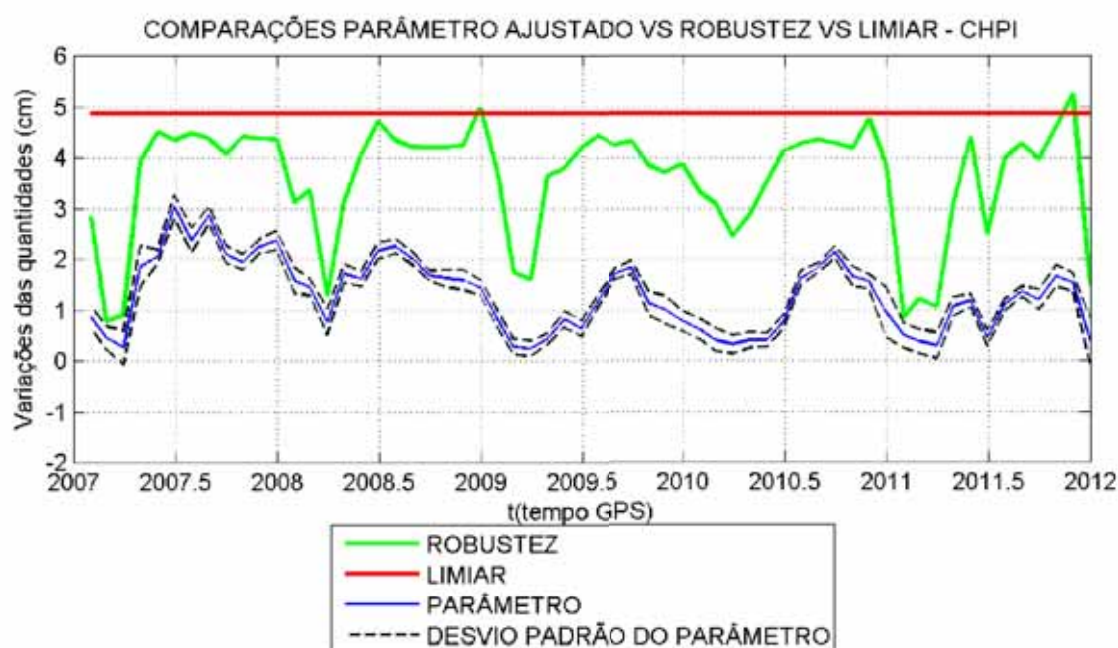


Figura 6.18: Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - CHPI

As classificações mensais para a estação CHPI foram praticamente robustas, na maior parte da série, menos em Novembro de 2011.

Com a Figura 6.18, ratifica-se a robustez para quase toda a série. O desvio padrão do parâmetro apresentou-se sem muitas variações, porém, mesmo sendo robusta, o

comportamento da robustez teve picos menores e parecidos no início dos anos.

Tabela 6.10: Análise de Robustez estação IMBT

Anos	Meses												Robustez
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	em %
2007	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
2008	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	60%
2009	Robusto	Robusto	Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Não Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	40%
2010	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
2011	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	Robusto	100%
Legenda: Robusto			Não Robusto			$R =$						80	

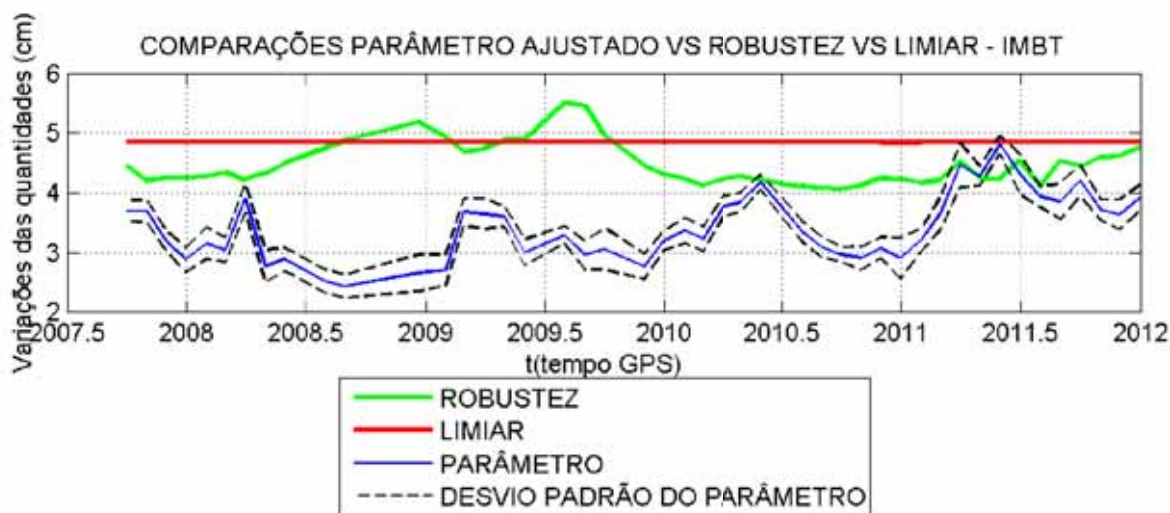


Figura 6.19: Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - IMBT

Para a estação IMBT, os anos com mais meses robustos foram 2007, 2008, 2010 e 2011. Em 2009, janeiro, de abril a setembro os meses foram não robustos, sendo este ano a maior predominância de não robustez.

Na Figura 6.19, ratifica-se o apresentado na Tabela 6.10. O comportamento da robustez e do parâmetro não apresentam nenhuma sazonalidade ou comportamento sistemático, ratificando as séries temporais apresentadas na Figura 6.8.

Tabela 6.11: Análise de Robustez estação RECF

Anos	Meses												Robustez	
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	em %	
2001													0%	
2002			–										0%	
2003													0%	
2004													0%	
2005													0%	
2006									–	–	–	–	0%	
2007	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
2008													55,55%	
2009													22,22%	
2010													100%	
2011													90,91%	
Legenda: Robusto												Não Robusto	R =	26,87

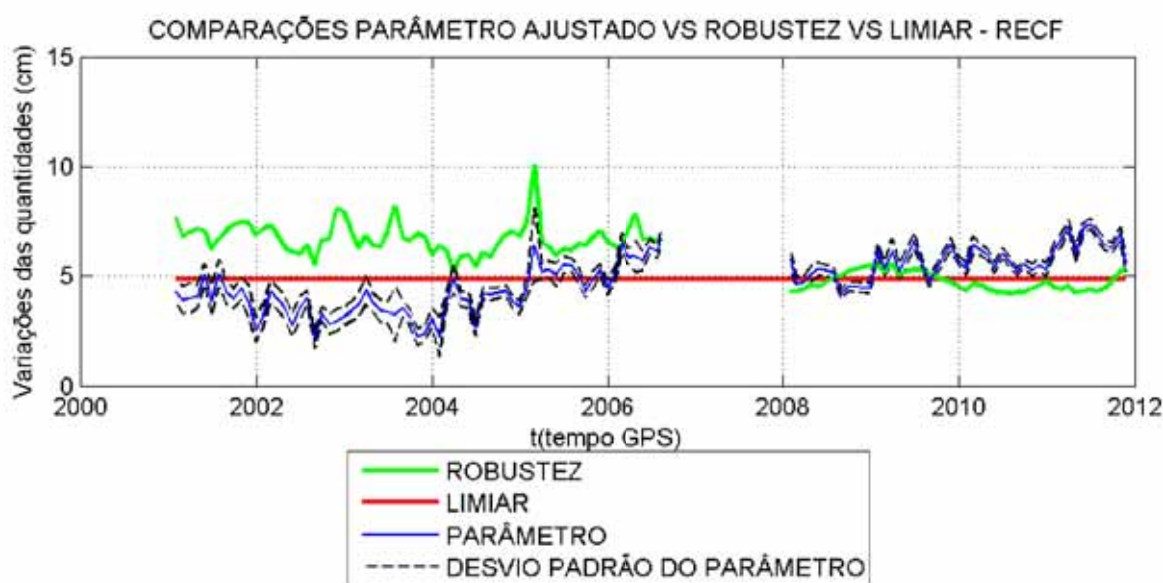


Figura 6.20: Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - RECF

A estação RECF apresentou uma predominância na robustez apenas nos anos 2008, 2010 e 2011. De 2001 a 2006, em todos os meses a estação não foi robusta, e em 2009 tem-se um predomínio de não robustez.

No gráfico das séries temporais, Figura 6.20, de 2001 a 2006, a classificação como não robusto pode-se associar a correlação com o desvio padrão, sendo maior para este período. Posteriormente, mesmo com um desvio padrão menor, algumas partes da série temporal foi não robusta ou quase não robusta.

A análise de robustez para a estação CUIB, apresenta uma divisão similar a das outras estações. Para a estação CUIB, a análise é não robusta, neste caso para nenhum

Tabela 6.12: Análise de Robustez estação CUIB

Anos	Meses												Robustez
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	em %
2001													0%
2002													0%
2003													0%
2004													0%
2005													0%
2006													0%
2007								-	-	-	-	-	71,43%
2008								-					100%
2009													100%
2010													91,67%
2011													91,67%
Legenda: Robusto												$R =$	32,25

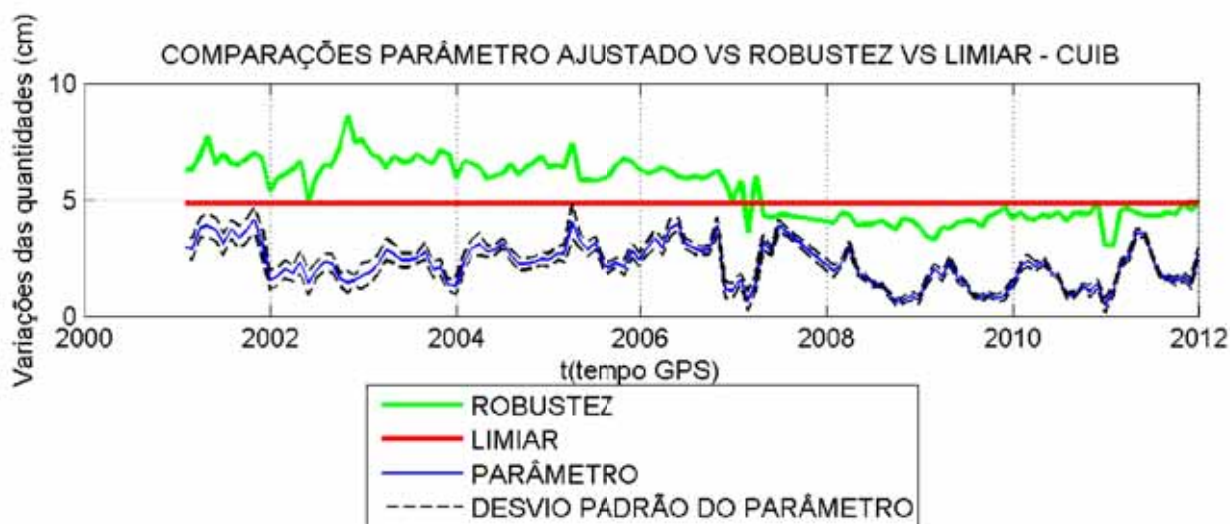


Figura 6.21: Comparação Parâmetro estimado, robustez e limiar - CUIB

dos anos iniciais, de 2001 até final de 2006. De 2007 em diante, predomina-se, a classificação da estação, como sendo robusta.

Novamente, as séries temporais da Figura 6.21, ratifica o ocorrido na Tabela 6.12. Da mesma forma, verifica-se que a robustez está correlacionada com o desvio-padrão do parâmetro e após 2008 o parâmetro se comporta de maneira sazonal, comparando-se com a série temporal das componentes da estação CUIB na Figura 6.7.

De acordo com a teoria vista, se o ponto for robusto, pode-se dizer que em função do modelo ajustado mensalmente, o qual considera apenas os movimentos locais, as soluções pelo PPP foram condizentes com o modelo, o qual foi considerado como fixo.

Em outras palavras, a distância entre as duas séries temporais para aquele mês não foi considerável, ou seja, as deformações causadas pelos erros não detectáveis foram pequenas.

Caso contrário, se o ponto for classificado como não robusto, significa que existem pequenos erros nas observações que influenciaram nas análises. Estes erros podem ser de diversas causas identificados e removidos das observações para que posteriormente possa-se realizar análises sobre sua estabilidade.

Assim, na Tabela 6.13, segue a classificação dos pontos estáveis baseados na metodologia proposta.

Tabela 6.13: Classificação dos pontos estáveis.

Estações	Classificação dos Pontos	Extensão temporal (anos)
BRAZ	Não estável	10,00
CUIB	Não estável	11,00
FORT BRFT	Não estável	11,30
IMPZ	Não estável	11,00
MANA NAUS	Não estável	8,50
RECF	Não estável	11,00
CHPI	Estável	5,00
IMBT	Estável	5,00

Como apresentado na Tabela 6.13, as estações classificadas como estáveis foram CHPI e IMBT. Mesmo com a estratégia adotada para encontrar os pontos estáveis ressalta-se que um período pode ser não robusto por diversos fatores. Primeiramente, um dos fatores percebidos foi a correlação com o desvio-padrão dos parâmetro ajustados.

Eventos sistemáticos foram percebidas pelas séries dos parâmetros, estas estações são: BRAZ, CUIB, IMPZ e NAUS. Ressalta-se que na série temporal do parâmetro para a estação NAUS, as séries apresentaram picos no início dos anos, identificando, provavelmente os períodos de chuvas da região Amazônica.

Nas séries da estação CHPI, a série da robustez apresentou picos, de valores baixos, próximos ao início dos anos, porém, visualmente as séries temporais das componentes locais de coordenadas de CHPI apresentaram ser sazonais, porém com menores amplitudes, ou seja, este efeito pode ser algum fenômeno sistemático local no qual refletiu na robustez.

A maioria dos gráficos da robustez apresentaram correlação com o desvio-padrão, como mencionado anteriormente, retificando a técnica, na qual reflete somente na geometria das coletas (receptor-satélite) e acurácia das observações. Assim, de maneira

geral, pode-se perceber que os dados, na maioria das estações, tiveram uma robustez maior que os limiares impostos do início das análises até, em média, o ano de 2006 e 2007. Suspeitamente, algum efeito sistemático pode ter degradado a precisão das observações nestes períodos.

Tabela 6.14: Antenas utilizadas

Estações	Anos										
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
BRAZ											
CUIB											
FORT							-	-	-	-	-
BRFT	-	-	-	-	-						
IMPZ											
MANA				-	-	-	-	-	-	-	-
NAUS	-	-	-	-	-						
RECF											
CHPI	-	-	-								
IMBT	-	-	-	-	-	-					

Legenda	
	DORNE MARGOLIN T (TRM29659.00)
	DORNE MARGOLIN (ASH701945C_M)
	ZEPHYR GEODETIC (TRM41249.00)
	ZEPHYR GNSS GEODETIC (TRM41249.00)
	LEIAT504

A mudança de antenas pode ser a explicação para este suposto efeito sistemático. Ao sumarizar as mudanças de antenas das estações, obtidas dos relatórios do IBGE (disponíveis em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>), durante os anos de análises, pode-se perceber uma correlação com os resultados, como visto na Tabela 6.14. Todas as estações que utilizaram a antena DORNE MARGOLIN T (TRM29659.00) tiveram resultados de não robustez para o período em que se utilizaram da antena. Considerando que BRFT e NAUS, as quais substituíram FORT e MANA, respectivamente, são as mesmas estações, por se localizam na mesma região, todas as estações, menos CHPI e IMBT, utilizaram da antena DORNE MARGOLIN T.

Observando a Tabela 6.13, as estações que foram classificadas como estáveis, por terem maiores níveis de robustez, dentro da metodologia proposta, foram justamente CHPI e IMBT, as mesmas que não utilizaram a antena DORNE MARGOLIN T durante as análises. Observa-se ainda, que as épocas de trocas das antenas DORNE MARGOLIN por outros tipos de antenas são os momentos em que as estações iniciam

a ter os níveis de robustez menores que os limiaries. Portanto, há grandes indícios, de que as antenas DORNE MARGOLIN, continham algum efeito sistemático, os quais adicionaram erros ao modelo e, influenciaram nas análises da robustez das estações.

E, a partir da trocas das antenas, a robustez foi menor que os limiaries, mostrando que nestes períodos os erros sistemáticos ou grosseiros não foram suficientemente significativos para que degradassem as observações.

6.5 Análises após a substituição das antenas

Como apresentado na subseção 6.4, a definição ou escolha dos pontos estáveis foi baseada nos menores eventos de instabilidades locais, porém 6 das 8 estações, até os anos de 2006 e 2007, foram não robustas em quase que todos os meses. E, como visto, há indícios de que a robustez tenha sido afetada por um tipo de antena que as estações utilizaram durante este período.

Assim, teve-se a necessidade de apresentar os resultados, retirando o período em que esta antena era utilizada. Na sequência, apresentam-se, nas tabelas 6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20 os resultados da robustez, para todos os anos de cada estação que utilizou a antena DORNE MARGOLIN T(TRM29659.00).

Tabela 6.15: Análise de Robustez estação BRAZ

Anos	Meses												Robustez em %	
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ		
2008	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100%
2009	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	91,67%
2010	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	83,33%
2011	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	75%
Legenda: Robusto ■ Não Robusto ■													$R =$	87,5

Tabela 6.16: Análise de Robustez estação FORT/BRFT

Anos	Meses												Robustez em %	
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ		
2006b	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	91,67%
2007	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100%
2008	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100%
2009	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100%
2010	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	90,91%
2011	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	41,67%
Observação: FORT foi desativada no mês 04 de 2006a e BRFT ativada em 2006b														
Legenda: Robusto ■ Não Robusto ■													$R =$	87,40

Tabela 6.17: Análise de Robustez estação MANA/NAUS


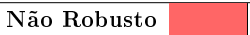
Anos	Meses												Robustez
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	em %
2004	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2005	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2006b													75%
2007													0%
2008													100%
2009													91,67%
2010													91,67%
2011													81,82%
Observação: MANA foi desativada no mês 12 de 2003a e NAUS ativada em 2006b													
Legenda: Robusto  Não Robusto  R = 73,36													

Tabela 6.18: Análise de Robustez estação IMPZ


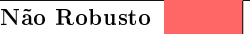
Anos	Meses												Robustez
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	em %
2008													100%
2009													100%
2010													100%
2011													75%
Legenda: Robusto  Não Robusto  R = 93,75													

Tabela 6.19: Análise de Robustez estação RECF


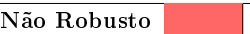


Anos	Meses												Robustez
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	em %
2008										–	–	–	55,55%
2009										–	–	–	22,22%
2010													100%
2011													90,91%
Legenda: Robusto  Não Robusto  R = 67,17													

Tabela 6.20: Análise de Robustez estação CUIB

Anos	Meses												Robustez em %			
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ				
2008								–					100%			
2009													100%			
2010													91,67%			
2011													91,67%			
Legenda: Robusto													Não Robusto		$R =$	95,83

Assim, na Tabela 6.21, segue a nova classificação, somente das estações que foram afetadas pelos possíveis erros sistemáticos da antena.

Tabela 6.21: Classificação dos pontos estáveis.

Estações	Classificação dos Pontos	Extensão temporal (anos)
BRAZ	Estável	4
FORT BRFT	Estável	6
MANA NAUS	Estável	6
IMPZ	Estável	4
RECF	Estável	4
CUIB	Estável	4

Como apresentado na Tabela 6.21, todas as estações seriam classificadas como estáveis ao retirar os dados problemáticos das análises. Assim, as análises de todos os dados em conjunto, pode classificar uma estação como não sendo estável, de acordo com a metodologia, porém-se deve-se atentar para possíveis efeitos sistemáticos que podem fornecer falsas interpretações às análises, como pode ser visto nesta investigação.

7 Considerações finais e futuras contribuições

Esta proposta de análise de pontos estáveis, leva em consideração os fenômenos, ou movimentos, continentais e locais. No desenvolvimento da metodologia, tentou-se separar estes efeitos, de forma que o modelo matemático contivesse apenas as influências físicas locais nos parâmetros. Com a série temporal destes efeitos físicos locais, analisou-se, mensalmente, com base nas soluções diárias, a robustez do modelo. A análise de robustez nos diz o quão sensível os parâmetros são devido às deformações sofridas por pequenos erros nas observações e, os classificam utilizando um critério puramente geométrico em função de limiares impostos condizentes com a técnica utilizada.

Pontos robustos, baseados nesta metodologia, significam que os mesmos não tiveram nenhuma influência de efeitos sistemáticos ou grosseiros no modelo que comprometessem significativamente as observações.

Se os pontos forem classificados como não robustos em um mês, significa que as deformações causadas por pequenos erros nas observações foram significativas. Em outras palavras, influências físicas locais causaram uma degradação significativa nas observações, as quais foram obtidas das soluções do GAPS e a do modelo de velocidades VEMOS2009, assim, para aquela época, o ponto não foi estável.

Para a definição ou escolha dos pontos estáveis baseados nesta metodologia, utilizando-se de vários anos de soluções, classificaram-se como estáveis aqueles com menores eventos de instabilidades locais, ou seja, com menores eventos de não robustez nos resultados. As estações classificadas como estáveis foram: CHPI e IMBT. E as estações classificadas como não estáveis foram as restantes: BRAZ, CUIB, FORT/BRFT, IMPZ, MANA/NAUS e RECF.

Erros sistemáticos, os quais foram os maiores contribuintes para a não estabilidade das estações classificadas como tal, podem estar associados a um tipo específico de antena.

Esta dissertação ainda deixa em aberto algumas questões que necessitam ser melhor exploradas em trabalhos futuros, como o do desenvolvimento de uma metodologia para a imposição dos limiares e análise espectral das séries temporais da robustez para melhor compreender a técnica proposta.

Para futuros trabalhos, recomenda-se a avaliação das estações, até mesmo novas estações, até os dias atuais. Para que se continue avaliando e entendendo os índices de robustez.

Outra recomendação a ser considerada nesta proposta, seria a comparação entre as análises de robustez em rede e o PPP.

Um conhecimento das análises de robustez em tempo real seria uma ótima ferramenta para identificar pequenas falhas sistemáticas e grosseiras nos modelos. Análises em tempo real, é a tendência em várias aplicações na área de ciências cartográficas. Uma ferramenta para detecção de pontos estáveis em tempo real auxiliaria áreas como geologia, geodinâmica e projetos de engenharias.

Como contribuições, mesmo em novas abordagens, como em tempo real, resultados como dessa pesquisa servirão de base para se conhecer os históricos e comportamentos destas estações ou regiões em que foram analisadas.

Com estas informações, o conhecimento de um modelo de deformação para a superfície, baseado nas séries temporais dos deslocamentos dos mesmos, seria de fácil implementação, uma vez que os dados já estão disponíveis.

Outra área de contribuição se associam com a determinação do movimento de placas. Com as soluções temporais de coordenadas, relacionando-se com as velocidades, em um modelo matemático dinâmico, ao ajustar todas as épocas, poderia obter as velocidades, bem como os parâmetros para a placa.

Referências

- [1] ROBERTS, C.; RIZOS, C. Permanent automatic gps deformation monitoring systems: a review of system architecture and data processing strategies. In: IAG SCIENTIFIC ASSEMBLY. *Section: Advances in positioning and reference frame*. Buenos Aires, Argentina, 1997.
- [2] CHEN, Y. *Analysis of deformation surveys: A generalized method*. Tese (Doutorado) — University of New Brunswick, Fredericton, 1983.
- [3] KOUBA, J. A. A guide to using international gnss service (igs) products. *Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada*, 2009.
- [4] LEANDRO, R. F.; SANTOS, M. C.; LANGLEY, R. B. Analysing gnss data in precise point positioning software. *GPS Solut*, Springer Verlag, 2010.
- [5] VANÍCEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. *Geodesy: the concepts*. Michigan, USA: North Holland Publishing Company, 1986.
- [6] VANÍCEK, P. et al. *Robustness Analysis*. [S.l.], 1991.
- [7] SEEBER, G. *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*. Berlin, Germany: Walter de Gruyter GmbH and Co. KG, 2003.
- [8] MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrições, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Unesp, 2008.
- [9] LI, Z. et al. Two-step method for the determination of the differential code biases of compass satellites. In: *Springer-Verlage 16 April*. [S.l.: s.n.], 2012.
- [10] SHU-HUA, Y.; KOICHI, Y. Relations between the earth's rotation and plate motion. In: AMERICAN GEOPHYSICAL UNION. *Recent Plate Movements and Deformation Symposium on Deformation Measurements*. Washington, D.C., 1987.
- [11] TURCOTTE, D. L.; SCHUBERT, G. *Geodynamics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.
- [12] TASSINARI, C. G. Decifrando a terra. In: _____. [S.l.: s.n.], 2000. cap. Cap 6: Tectônica de Placas.

-
- [13] ALVES, S. M. C.; SANTOS, M. C.; GEMAEL, C. A velocity field estimation of the brazilian portion of the soam plate. In: *Springer-Verlage 28 June*. [S.l.: s.n.], 2003.
- [14] BAARDAH, W. A testing procedures for use in geodetic networks. *Publications on Geodesy*, v. 2, 1968.
- [15] TEIXEIRA, N.; FERREIRA, L. Análise da confiabilidade de redes geodésicas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, UFPR, 2003.
- [16] KUANG, S. *Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications*. Michigan, USA: Ann Arbor Press, 2001.
- [17] SANTOS, A. J. P. M. *Proposta de ajustamento para melhoria da confiabilidade e precisão dos pontos de redes geodésicas para fins topográficos*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, São Paulo, 2006.
- [18] ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338–353, 1965.
- [19] BERBER, M.; VANÍCEK, P.; DARE, P. Robustness analysis of 3d networks. *Journal of Geodynamics*, v. 47, p. 1–8, 2009.
- [20] VANÍCEK, P.; KWIMBERE, M. D. Displacements versus strain. In: *5th International (FIG) Symposium on Deformation Measurements*. [S.l.: s.n.], 1988.
- [21] DREWES, H.; HEIDBACH, O. The 2009 horizontal velocity field for south america and the caribbean. In: IAG SCIENTIFIC ASSEMBLY “GEODESY FOR THE PLANET EARTH”. *Symposium 3 Geodynamics*. Buenos Aires, Argentina, 2009.