

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA

IGOR MEDEIROS ARRUDA

**ANÁLISE DO TESTE DE CONGRUÊNCIA GLOBAL NA DETECÇÃO DE
DESLOCAMENTOS COM GNSS EM LINHAS DE BASE CURTAS**

MONTE CARMELO

2019

IGOR MEDEIROS ARRUDA

**ANÁLISE DO TESTE DE CONGRUÊNCIA GLOBAL NA DETECÇÃO DE
DESLOCAMENTOS COM GNSS EM LINHAS DE BASE CURTAS**

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho
de Conclusão de Curso 1 do Curso de Engenharia
de Agrimensura e Cartográfica da Universidade
Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Carrupt Machado

**MONTE CAMELO
2019**

RESUMO

Obras de engenharia civil são projetadas para serem flexíveis, essa movimentação precisa ser monitorada com intuito de evitar catástrofes. A monitoração geodésica por meio de receptor GNSS é amplamente conhecida, cada vez mais empregada em monitoramento de obras de engenharia. A utilização de um receptor não sendo em tempo real é uma forma de verificar o acompanhamento de obras menos complexas. Um dispositivo foi projetado para simular deslocamentos com receptor GNSS de simples frequência em linha de base curta de aproximadamente 60 metros. Cinco magnitudes foram analisadas (0 mm, 2mm 5mm 10 mm e 25 mm). Um rastreo de aproximadamente de 30 minutos foi feito sobre cada posição. Cada ponto foi rastreado três vezes, posteriormente ajustados pelo método paramétrico para obter as cinco posições por dia. O rastreo foi feito em duas épocas do ano, uma seca (Julho) e chuvosa (Outubro) afim de verificar a influência desses períodos nos deslocamentos. O deslocamento sobre o dispositivo avaliado realizado a diferença de coordenadas entre épocas e aplicando o teste de congruência global. Por fim foi verificado que um receptor de simples frequência aplicando redundância nas observações é viável para detectar deslocamento de ordem superior a 10 mm com nível de significância de 0,05.

PALAVRAS-CHAVE: Geodésia. Monitoramento. Teste de Congruência Global.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do deslocamento	13
Figura 2 - Representação do ITRS	15
Figura 3- Estações de Referência do SIRGAS	17
Figura 4 - Sistema Geodésico Local	19
Figura 5 - Relação entre os métodos de posicionamento	25
Figura 6 - Método de Posicionamento Relativo	26
Figura 7 - Área de Estudo	32
Figura 8 - Receptor Hiper V	33
Figura 9 - Dispositivo de simulação	33
Figura 10 - Paquímetro Digital 150 mm	34
Figura 11- Fluxograma do trabalho	34
Figura 12 - Medição dos deslocamentos em campo	36
Figura 13- Épocas de levantamento	38
Figura 14 - Multicaminho	39
Figura 15 – Processamento das linhas de Base no Topocon Tools	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Fluxo Solar de Julho a Outubro.	37
Gráfico 2 - Diferença entre 3D e 2D – 08/07/2019	48
Gráfico 3 - Diferença entre 3D e 2D – 09/07/2019	49
Gráfico 4 - Diferença entre 3D e 2D – 10/07/2019	51
Gráfico 5 - Diferença entre 3D e 2D – 12/10/2019	52
Gráfico 6 – Diferença entre 3D e 2D – 13/10/2019.....	53
Gráfico 7 - Gráfico entre o deslocamento realizado e deslocamento GPS - 3D.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fonte e efeitos dos erros envolvidos no GNSS	23
Tabela 2 - Contribuição dos erros GNSS na pseudodistância	24
Tabela 3 - Estimativa de precisão para o método do posicionamento relativo estático	27
Tabela 4 - Atraso Troposférico	38
Tabela 5 - Processamento Topocon Tools 08/07/2019	41
Tabela 6 - TCG Análise de estabilidade do dispositivo de simulação	46
Tabela 7 - Média e desvio padrão das diferenças	47
Tabela 8 – TCG 3D 08/07/2019	47
Tabela 9 – TCG 3D 09/07/2019	49
Tabela 10 - TCG 3D 10/07/2019	50
Tabela 11 - TCG 3D 12/10/2019	51
Tabela 12 - TCG 3D 13/10/2019	53
Tabela 13- TCG dias 09/07 e 10/07	55
Tabela 14 - TCG 2D dias 12/10 e 13/10	56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BIH	<i>Bureau International de l'Heure</i>
DGFI-TUM	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut - Technische Universität München</i>
DGNSS	<i>Differential GNSS</i>
DORIS	<i>Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite</i>
GLONASS	<i>Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IDS	<i>International DORIS Service</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGS	<i>International GPS service</i>
ILRS	<i>International Laser Ranging Service</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
IUGG	<i>International Union of Geodesy and Geophysisc</i>
IVS	<i>International VLBI Service</i>
LLR	<i>Laser Lunar Range</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo</i>
SGB	<i>Sistema Geodésico Brasileiro</i>
SGL	<i>Sistema Geodésico Local</i>
SIRGAS	<i>Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas</i>
SIRGAS CON	<i>Rede SIRGAS de Monitoramento Contínuo</i>
SISRE	<i>Signal-in-space (user) Range Error</i>
SLR	<i>Satellite Laser Range</i>
TCG	<i>Tempo Coordenado Geocêntrico</i>
TCG	<i>Teste de Congruência Global</i>
UEE	<i>User Equipment Error</i>
UERE	<i>User Equivalent Ranger Error</i>
VLBI	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVO	11
3 JUSTIFICATIVA	11
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
4.1 Monitoramento de Estruturas	12
4.1.1 Deslocamento	13
4.2 Sistemas de Referência	13
4.2.1 Sistema Referência Terrestre Internacional – ITRS	14
4.2.2 Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS	16
4.2.3 Sistema Geodésico Brasileiro – SGB	18
4.2.4 Sistema Geodésico Local – SGL	18
4.3 GNSS	21
4.3.1 Observáveis	21
4.3.2 Erros que incidem sobre as observações GNSS	23
4.3.3 Técnicas de Posicionamento com GNSS	24
4.3.3.1 <i>Posicionamento Relativo</i>	25
4.3.3.2 <i>Posicionamento Relativo Estático</i>	26
4.4 Ajustamento de Observações	27
4.5 Teste de Congruência Global	29
5 MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1 Área de estudo	32
5.3 Metodologia	34
5.3.2 Levantamento de campo	35
5.3.3 Processamento dos dados	40
5.3.4 Transformação de coordenadas geodésicas para topográficas locais	41
5.3.5 Ajustamento de Observações - Método Paramétrico	42
5.3.5 Aplicação do Teste de Congruência Global	44
5.3.6 Análise dos deslocamentos	44
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
6.1 Análise de estabilidade do dispositivo de simulação	45
6.2 Avaliação do nível de significância no tridimensional (3D) e bidimensional (2D)	47

6.3 Detecção de deslocamento tridimensional e bidimensional com maior redundância	54
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Obras de engenharia civil como pontes, viadutos, barragens, edifícios altos, encostas e formações rochosas são estruturas consideradas de grande porte. Esses tipos de construções são desenvolvidos para durar por longos períodos, mas como já se sabe, estruturas naturais e artificiais sofrem desgastes com o tempo, devido às ações da natureza e forças que atuam sobre as estruturas.

As construções, hoje, são projetadas de forma a serem mais flexíveis para suportar danos causados por grandes rajadas de ventos, variação de temperatura e tremores de terra. Por mais que a estrutura seja feita para resistir, sempre terá um limite onde esses deslocamentos e deformações são prejudiciais à saúde da estrutura. Quando tais grandezas não são monitoradas podem acarretar no colapso total da estrutura, causando perdas econômicas, materiais e humanas. Desse modo, o monitoramento é de suma importância, pois ele é capaz de detectar movimentações e alterações na estrutura antes que elas entrem em estado de degradação total.

A supervisão de deslocamentos estruturais pode ser realizada por meio de técnicas de mensuração geodésica. Alguns autores como Chaves (2001); Bueno (2007); Fazan (2010); Poletto (2010); Siguel (2013); Nadal (2015); Silva, Miranda e Monico (2015) e Araújo Neto (2017), realizaram estudos aplicando esse método para monitorar tais estruturas. No que se refere as técnicas elas podem ser por triangulação geodésica, poligonação, nivelamento geométrico de precisão e determinação de coordenadas por meio do *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS). Todos esses métodos têm por finalidade determinar coordenadas planimétricas e altimétrica e avaliar sua variação ao longo do tempo. A qualidade do monitoramento geodésico vai depender do equipamento (estação total, receptor GNSS ou nível) e do método empregado.

O GNSS apresenta algumas vantagens em relação aos métodos clássicos da geodésia, podemos citar: a precisão, a não necessidade de ter visibilidade entre os pontos, desenvolvimento de redes que aumentam a confiabilidade das medidas e a possibilidade de monitorar continuamente. As precisões a serem obtidas com os receptores dependem do equipamento, do método de posicionamento aplicado, fatores climáticos e atmosféricos, obstruções próximas aos receptores e o software usado no processamento das observações.

A hipótese desse trabalho é analisar a potencialidade do receptor GNSS de simples frequência em linhas de base curtas, de aproximadamente até 60 m por meio do teste de congruência global, para detectar deslocamentos simulados em obras de engenharia civil com *software* de processamento comercial, caracterizando um sistema de baixo custo.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como finalidade analisar a potencialidade do uso do GNSS na detecção de deslocamentos por meio do teste de congruência global em obras de engenharia civil sobre a influência de diferentes fontes de erros em duas épocas do ano, verificados por meio de simulação utilizando dispositivo que realiza o deslocamento horizontal e tendo seu processamento realizado com software comercial.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Analisar a estabilidade do dispositivo de deslocamento;
- Avaliar o efeito do nível de significância na detecção de deslocamento
- Verificar a influência da quantidade de observações para detectar deslocamentos.

3 JUSTIFICATIVA

Com a escassez de monitoramento de obras de engenharia civil no Brasil, tais como prédios, pontes e barragens, é crescente o número de acidentes. Portanto, torna-se cada vez mais necessário acompanhar o movimento dessas estruturas, pois com o passar dos anos elas podem acabar entrando em colapso, acarretando prejuízos econômicos, materiais e perda de vidas humanas, a exemplo do rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG; rebentação da barragem de fundão, em Mariana/MG; ponte da marginal Pinheiros, em São Paulo/SP e a queda do viaduto do Eixão Sul, em Brasília/DF.

As técnicas de monitoramento geodésico têm ganhado cada vez mais atenção devido ao avanço tecnológico na área, pois os equipamentos e programas de processamento de dados GNSS proporcionam resultados cada vez mais precisos, o que as tornam atrativas para serem empregados na detecção de deslocamento de estruturas. As novas tecnologias têm um alto custo de implementação, o que acaba inviabiliza o monitoramento de obras menos complexas, atualmente os monitoramentos geodésicos são realizados por estações robóticas com elevado custo para realizar um monitoramento 24 horas e ainda necessita de uma central de processamento a fim de realizar a transmissão dos dados. Outra tecnologia importante que é empregada no acompanhamento de movimentações estruturais é o NTRIP (*Network Transport of RTCM via Internet Protocol*) que é um protocolo de transmissão dos dados coletados pelo receptor GNSS via internet, sendo assim possibilitando, um monitoramento em tempo real.

Uma solução alternativa ao alto custo na implementação de um sistema de monitoramento geodésico seria realizar um monitoramento não sendo em tempo real e empregando um software comercial para processar os dados, obtendo-se, desta forma, informações para se determinar os menores deslocamentos possíveis de serem detectados pelo TGC (teste de congruência global)

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Monitoramento de Estruturas

Monitorar é verificar o comportamento de um determinado evento em escala temporal. O processo de medição sistemática visando acompanhar os deslocamentos e deformações é denominado de monitoramento de estruturas. Segundo Fazan (2010), as estruturas podem ser naturais como a crosta terrestre, encosta e cavernas, também podem ser artificiais, como torres, edifícios, pontes e barragens.

No Brasil não foi encontrado normativas que apresente os requisitos para o monitoramento de estruturas por meio de receptores Geodésicos, portanto foi utilizado a normativa do *Department of The Army* (1994) Departamento de defesa dos Estados Unidos, onde informa que o monitoramento de estruturas pode ser dividido em dois grupos:

- Levantamentos geodésicos que incluem, os levantamentos terrestres, posicionamento por satélite, fotogramétrico e técnicas especiais (interferometria, nivelamento hidrostático);
- Medidas geotécnicas que são realizadas com emprego de extensômetros, inclinômetros e fios de prumo.

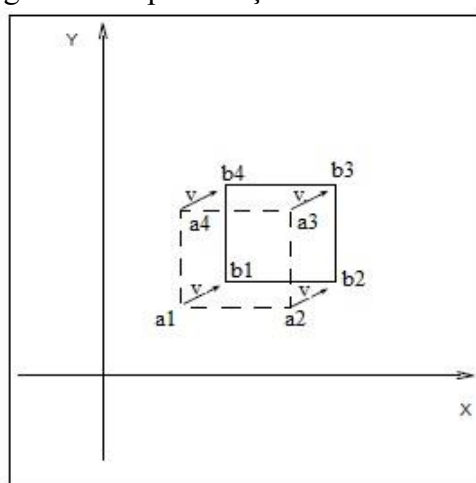
O monitoramento geotécnico é eficaz para detectar deslocamentos pontuais na estrutura, já no geodésico é possível ter uma visão mais global do deslocamento. O método geodésico consiste em obter coordenadas de pontos sobre a estrutura em épocas diferentes, havendo diferença entre as coordenadas obtidas em épocas distintas é possível afirmar que ocorreu um deslocamento.

4.1.1 Deslocamento

O deslocamento é quando ocorre a movimentação de um ponto ou corpo rígido em relação a um referencial fixo, essa deslocação pode ocorrer por rotação ou translação. (FAZAN, 2010). Segundo Bueno (2007), as estruturas podem ser deslocadas por alguns fatores com:

A Figura 1, representa um deslocamento paralelo (translação) da época a para a época b , onde v representa o vetor do deslocamento.

Figura 1 - Representação do deslocamento



Fonte: Adaptado de Fazan (2010, p.19)

4.2 Sistemas de Referência

Por meio de um sistema de referência cartesiano fixo à Terra é possível, verificar, descrever, representar e analisar as alterações naturais ou artificiais do meio ambiente, bem como acompanhar os movimentos de objetos sobre a superfície (RODRIGUES, 2002). O monitoramento geodésico tem por finalidade analisar os deslocamentos em função da variação de coordenadas ao longo do tempo, portanto, é imprescindível que se disponha de um sistema de referência confiável. Sistema de referência é definido por uma fixação teórica no espaço por se tratar de conceito abstrato e sua realização deve ocorrer a partir de coletas de observações com objetivos de determinar coordenadas de pontos materializados (RODRIGUES, 2002).

A partir da década de 60, o lançamento de satélites com finalidade de posicionamento proporcionou o desenvolvimento da geodésia tridimensional, sendo possível obter coordenadas cartesianas (y_1, y_2, y_3) do centro de fase da antena do receptor referido a um terno cartesiano geocêntrico (Y_1, Y_2, Y_3) (BLITZKOW et al. 2011). Quando necessário essas coordenadas cartesianas podem ser convertidas em coordenadas geodésicas (ϕ, λ e h) que é um sistema que

tem sua origem fixada no centro geométrico do elipsoide, onde o h representa a altitude elipsoidal ou geodésica (BLITZKOW et al. 2011).

As equações 1, 2, 3, 4, e 5 apresentam a transformação de coordenadas geodésicas (φ , λ e h) em coordenadas cartesianas geocêntricas (X , Y e Z). Para realizar a transformação é necessário conhecer os parâmetros do elipsoide adotado. O GRS 80 é o elipsoide adotado no Brasil. Onde:

- Semi-eixo maior “ a ” = 6.378.137 m;
- Achatamento “ f ” = 1/298,257222101.

$$X_p = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \quad (1)$$

$$Y_p = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \quad (2)$$

$$Z_p = [N(1 - e^2) + h] \sin \varphi \quad (3)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (4)$$

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (5)$$

Onde:

(φ , λ e h) coordenadas geodésicas do ponto;

N é o raio de curvatura da seção vertical;

e^2 é a excentricidade ao quadrado

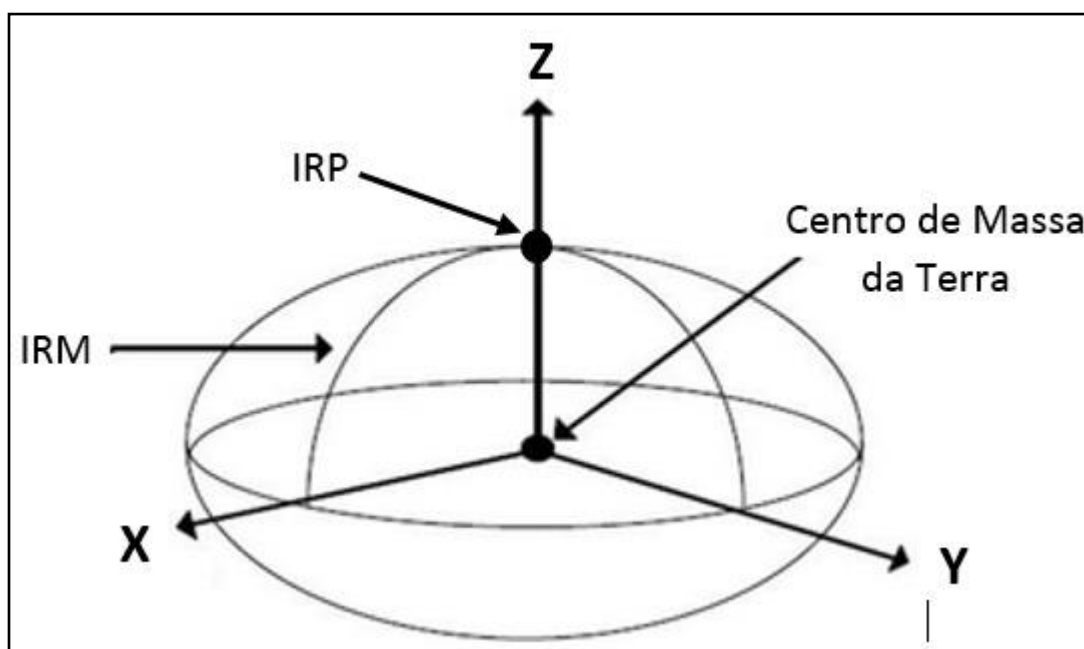
4.2.1 Sistema Referência Terrestre Internacional – ITRS

O Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS - *International Terrestrial Reference System*) é estabelecido pelo Serviço Internacional de Rotação e Sistemas de Referência da Terra (IERS - *International Earth Rotation and Reference Systems Service*) (BLITZKOW; MATOS, 2002). Segundo a resolução n.º 2 da Associação Internacional de Geodésia e Geofísica (IUGG - *International Union of Geodesy and Geophysics*), adotada em 1991, o ITRS deve atender as seguintes definições (MONICO, 2008).

- Origem geocêntrica, inclui o centro de massa da Terra, os oceanos e atmosfera;

- Escala consistente com o Tempo Coordenado Geocêntrico (TCG), para um dado referencial geocêntrico;
- Orientação definida pelo *Bureau International de l'Heure* (BIH), na época 1984,0;
 - Eixo Z que aponta para a direção do polo de referência internacional (IRP);
 - Eixo X orientado na direção do meridiano de referência internacional (IRM);
 - Eixo Y torna o sistema dextrogiro.
- Evolução temporal da orientação assegurada pelo uso da condição de uma rede que não rotacional (NNT – *No Net Rotation*) de acordo com os movimentos tectônicos horizontais sobre a terra.

Figura 2 - Representação do ITRS



Fonte: Adaptado de Slide¹ Aula 05 do Prof Dr. Carlos Aurelio Nadal.

A materialização do Sistema de Referência Terrestre Internacional (Figura 2) é de responsabilidade do IERS. A origem do sistema é determinada pelas técnicas *Satellite Laser Range* (SLR), *Laser Lunar Range* (LLR), visto que estão relacionados a corpos que orbitam em torno do centro de massa da Terra. O *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), *Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite* (DORIS) e GNSS são as tecnologias empregadas na obtenção da escala. A orientação não pode ser determinada por nenhuma técnica descrita, então foi estabelecida convencionalmente, por esse motivo não é possível obter a sua variação ao longo do tempo. Caso o leitor deseje mais detalhe sobre o assunto pode consultar Blitzkow et al., (2011).

¹ Disponível em < <https://slideplayer.com.br/slide/1596645/> > Acesso em: 12 de dezembro 2019.

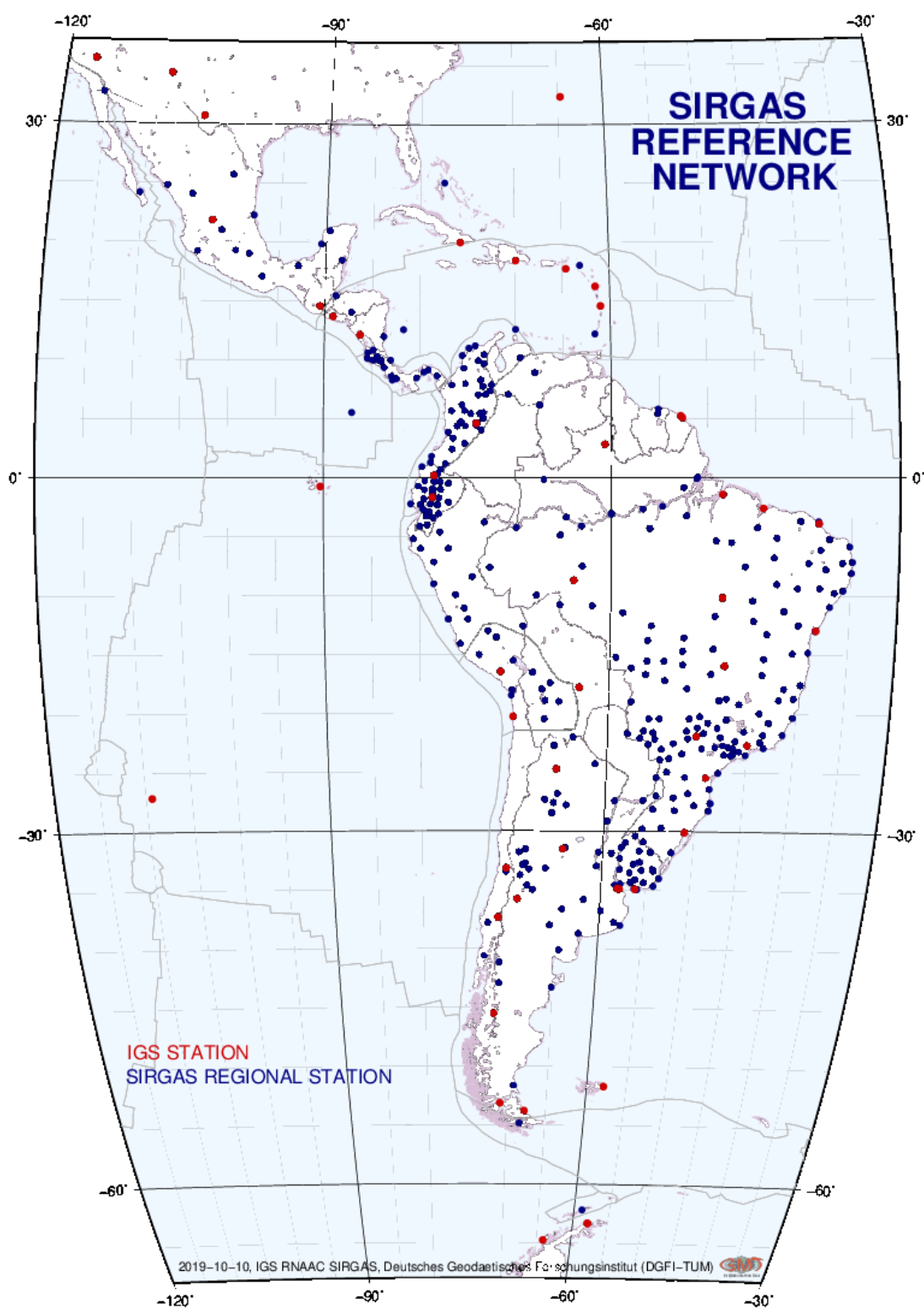
Com a constante evolução das tecnologias e modelos matemáticos utilizados pela geodésia espacial (SLR, LLR, VLBI, DORIS e GNSS), o ITRF passou por sete realizações, sendo a última em 2014.

4.2.2 Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS

A materialização do Sistema de Referência Terrestre Internacional é executada por meio de redes de âmbito global, gerenciadas pelo *International GNSS Service* (IGS), *International Laser Ranging Service* (ILRS), *International VLBI Service* (IVS) e *International DORIS Service* (IDS). Essas redes possuem pontos separados por milhares de quilômetros. Devido a necessidades práticas visando obter coordenadas mais precisas é indispensável densificar essas redes, resultando no estabelecimento de redes com o espaçamento menor (BLITZKOW; MATOS, 2002). Sendo assim, foram estabelecidos sistemas de referências continentais, como o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), que pode ser entendido como uma densificação da componente IGS do ITRF na região americana.

O SIRGAS 95 foi a primeira realização do sistema, a qual foi executada por uma campanha *Global Positioning System* (GPS) em 1995 utilizando dados de 58 estações. A segunda realização foi no ano 2000, época 2000,4, onde foram utilizados dados de 184 estações. Essa realização foi denominada de SIRGAS2000. Atualmente, o SIRGAS é realizado por estações de monitoramento contínuo (SIRGAS-CON). Essas estações possuem coordenadas semanais ajustadas ao ITRF (associadas à época da observação), sendo possível monitorar suas variações ao longo do tempo (SIRGAS, 2019). Hoje, a rede SIRGAS-CON possui cerca de 400 estações. Esse grande número de estações só é possível com a colaboração de diversas entidades que mantêm suas operações de acordo com as normas propostas e sua devida manutenção (SIRGAS, 2019). A rede SIRGAS-CON é subdividida em duas redes, a SIRGAS-C (em vermelho na Figura 3), que é uma densificação da componente GNSS do ITRF para as Américas. Esta rede possui uma boa cobertura continental e suas estações são materializadas em locais estáveis a fim de garantir a estabilidade da rede a longo prazo, tendo seus dados processados semanalmente pelo Instituto Alemão de Pesquisa Geodésica - *Technische Universität München* (DGFI-TUM - *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut - Technische Universität München*). A segunda rede é de densificação nacional, sendo denominada de SIRGAS-N (em azul na Figura 3). Ela possui as mesmas características da rede continental, seu processamento no Brasil é realizado pelo IBGE (SIRGAS, 2019).

Figura 3- Estações de Referência do SIRGAS



Fonte: SIRGAS (2019)²

² Disponível em < <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/> >. Acesso em 02 de dezembro de 2019.

4.2.3 Sistema Geodésico Brasileiro – SGB

O IBGE é o órgão oficial que é responsável por definir, implantar e realizar a manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro que conta com rede planimétrica, altimétrica e gravimétrica (MONICO, 2008). O referencial horizontal adotado atualmente no Brasil é o SIRGAS 2000 (BRASIL, 2005; IBGE, 2015).

A implementação da rede planimétrica no Brasil começou na década de 1940. Inicialmente, essa rede era denominada de passiva, pois havia a necessidade de ocupar um ou mais marcos para a realização de novos levantamentos. A partir da década de 90 começaram a instalação de estações geodésicas de referência que tem como características coordenadas de alta precisão, descritivo de localização e um receptor GNSS que coleta observações de forma contínua durante todo o ano (PEREIRA; OLIVEIRA, 2003). Essa componente da rede planimétrica é caracterizada como uma rede ativa, pois não é preciso ocupar o marco da estação para a realização do levantamento, pois a mesma já se encontra ocupada permanentemente. Essa rede ativa é conhecida por Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), atualmente a rede possui 120 (02/12/2019) estações com as seguintes configurações (IBGE, 2019):

- Pilar ou marco é onde está instalado um dispositivo de centragem forçada que materializa o ponto com as coordenadas geodésicas;
- Antena geodésica;
- Receptor geodésico com capacidade de rastrear satélites GPS e GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*);
- Conexão com internet para a transmissão dos dados;
- Constante fornecimento de energia;

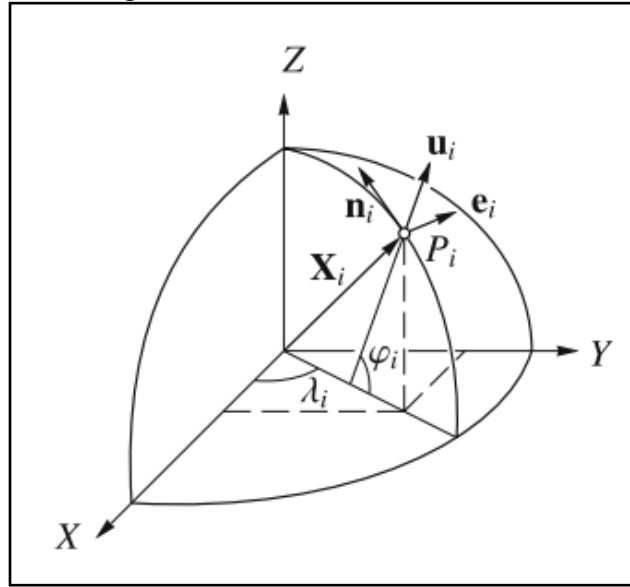
É importante destacar que a RBMC faz parte do SIRGAS-N, sendo uma rede de densificação nacional. Seus dados são processados pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). A RBMC tem um papel importante, pois desde 1997 vem contribuindo para crescimento da rede do IGS (IBGE, 2019).

4.2.4 Sistema Geodésico Local – SGL

O sistema Geodésico local é definido por um plano ortogonal ao elipsoide, sendo constituído de três eixos, norte (n), leste (e) e vertical (u) caracterizando um sistema cartesiano

tridimensional. Onde “n” aponta para direção norte geodésico, o eixo “e” aponta para leste sendo perpendicular a “n”. Esses dois eixos estão sobre o plano ortogonal ao elipsoide. O eixo “u” está alinhado com a normal ao elipsoide que passa pelo ponto “P”, esse ponto determina a origem do sistema (MONICO, 2008). A Figura 4 representa os três eixos no sistema geodésico local.

Figura 4 - Sistema Geodésico Local



Fonte: Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008, p.281)

A equação 6 apresenta a transformação entre o Sistema Geodésico Cartesiano Tridimensional para o Sistema Geodésico Local por matrizes de rotação e translação (DAL'FORNO, 2010). Onde:

$$\begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 \\ 0 & -\cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\cos \lambda_0 & -\sin \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

A equação 7 é o resultado da multiplicação das matrizes da equação 6.

$$\begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 (X_p - X_0) + \cos \lambda_0 (Y_p - Y_0) \\ -\sin \varphi_0 \cos \lambda_0 (X_p - X_0) - \sin \varphi_0 \sin \lambda_0 (Y_p - Y_0) + \cos \varphi_0 (Z_p - Z_0) \\ \cos \varphi_0 \cos \lambda_0 (X_p - X_0) + \cos \varphi_0 \sin \lambda_0 (Y_p - Y_0) + \sin \varphi_0 (Z_p - Z_0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

- $(\varphi_0$ e λ_0) são as coordenadas geodésicas do ponto tomado como origem do Sistema Geodésico Local;

- $(X_0, Y_0 \text{ e } Z_0)$ são as coordenadas cartesianas do ponto tomado como origem do Sistema Geodésico Local, e;
- $(X_p, Y_p \text{ e } Z_p)$ são as coordenadas cartesianas geocêntricas do ponto a ser transformado do Sistema Geocêntrico para o Geodésico Local.

As coordenadas geodésicas obtidas através de observações por GNSS estão dispersas em torno de um valor, ou seja, apresentam variância. Deste modo quaisquer derivações dessas coordenadas também apresentarão variância, sendo assim, é indispensável realizar sua propagação.

Para realizar a propagação de variância-covariância deve-se derivar a equação 7 em função das coordenadas cartesianas geocêntricas $(X_p, Y_p \text{ e } Z_p)$ para obter a equação 8 (POLETO, 2010).

$$\Sigma_{enu} = R \cdot \Sigma_{XYZ} R^T \quad (8)$$

Onde:

$$R = \frac{\partial(e, n, u)}{\partial(x, y, z)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial e}{\partial \varphi} & \frac{\partial e}{\partial \lambda} & \frac{\partial e}{\partial h} \\ \frac{\partial n}{\partial \varphi} & \frac{\partial n}{\partial \lambda} & \frac{\partial n}{\partial h} \\ \frac{\partial u}{\partial \varphi} & \frac{\partial u}{\partial \lambda} & \frac{\partial u}{\partial h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 & -\sin \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde:

Σ_{enu} : é a MVC das coordenadas geodésicas locais

Σ_{XYZ} : é a MVC das coordenadas geodésicas geocêntricas

4.3 GNSS

4.3.1 Observáveis

As observáveis do GNSS têm o objetivo de determinar a posição, velocidade e o tempo (LANGLEY, 1996). Segundo Seeber (2003), existem quatro observáveis que podem ser obtidas por um receptor: pseudodistância, diferença entre pseudodistância entre contagens Doppler, fase da onda portadora, diferença do tempo de propagação do sinal utilizando medidas interferométricas. As duas principais são a pseudodistância e a fase da onda portadora.

Os sistemas de navegação global por satélite portam relógios atômicos e caracterizam o sistema de tempo do satélite (t^s), onde os códigos são gerados ($G^s(t)$) e posteriormente transmitidos. A grande maioria dos receptores dispõem de osciladores de baixa qualidade, o mesmo trabalha no sistema de tempo do receptor (t_r) (MONICO, 2008). A escala de tempo satélite e receptor se associam ao sistema de tempo GNSS (t_r e t^s), pela equação 10 e 11.

$$t^s = t^s - dt^s \quad (10)$$

$$t_r = t_r - dt_r \quad (11)$$

Onde:

dt^s -Erro do relógio do satélite e relação ao tempo GNSS no instante t^s

dt_r -Erro do relógio do receptor e relação ao tempo GNSS no instante t_r

Os receptores geram réplicas idênticas dos sinais transmitidos pelos satélites. Os sinais dos receptores são correlacionados com os sinais recebidos pelos satélites, esses sinais são deslocados até que se tenha correlação máxima (MONICO, 2008). O deslocamento em tempo, entre as duas sequências de sinais é o intervalo de propagação entre o sinal do satélite e o centro de fase da antena. A distância é obtida pelo intervalo de propagação entre o satélite e o receptor multiplicado pelo valor da velocidade da luz no vácuo (c) (MONICO, 2008).

A distância entre o satélite e o receptor é denominada de pseudodistância (PD_R^s) (equação 12) devido a diversos erros que acabam por influenciar no tempo de propagação do sinal entre o satélite e o receptor. O erro do relógio do receptor e a fonte de erro que mais afeta a medida.

$$PD_R^S = \rho_r^S + c[dt_r - dt^S] + I_r^S + T_r^S + dm_r^S + \varepsilon_{PD_r}^S \quad (12)$$

Onde:

ρ_r^S -Distância geométrica entre o receptor e o satélite, a qual deve ser calculada entre o instante de transmissão e o de recepção do sinal;

c -Velocidade da luz no vácuo;

dt_r -Erro do relógio no receptor;

dt^S -Erro do relógio no satélite;

I_r^S -Efeito provocado pela ionosfera;

T_r^S -Efeito provocado pela troposfera;

dm_r^S -Efeito provocado pelo multicaminho;

$\varepsilon_{PD_r}^S$ -Erro da medida da pseudodistância;

A diferença entre a fase do sinal do satélite recebida pelo receptor (ϕ^S) e a fase do sinal gerada pelo receptor (ϕ_r), ambas no instante de recepção (t_r) do sinal, é denominado de fase da onda portadora (ϕ_R^S) (MARQUES, 2012). Ela é bem mais precisa que a pseudodistância e é observada em número de ciclos (MONICO, 2008). Os receptores mensuram apenas uma fração do sinal depois iniciam um contador de número de ciclos que entram no receptor, resultando em uma medida contínua (MONICO, 2008). O número de ciclos (N_r^S) inteiros advindo da primeira observação entre a antena e o receptor é chamado de ambiguidade.

$$\begin{aligned} \phi_r^S(t) = f \left(\frac{\rho_r^S - I_r^S + T_r^S + dm}{c} \right) + \\ f * [(dt_r - dt^S)] + [\phi_t^S(t_0) - \phi_r(t_0)] + N_r^S + \varepsilon_{\phi_r}^S \end{aligned} \quad (13)$$

Onde:

ϕ_r^S -Fase da onda portadora;

f -Frequência da fase;

$\phi_t^S(t_0)$ -Fase inicial no satélite, correspondente à época de referência (t_0);

$\phi_r(t_0)$ -Fase inicial no receptor, correspondente à época de referência (t_0);

N_r^S -Ambiguidade da fase no instante de rastreo;

$\varepsilon_{\phi_r}^S$ - Erro da fase da onda portadora;

As outras variáveis da equação da fase da onda portadora já foram descritas na equação

4.3.2 Erros que incidem sobre as observações GNSS

Durante o processo de coleta das observações é normal que eles possuam erros advindos de diferentes fontes. Esses erros podem ser aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Os erros aleatórios não são possíveis de modelar, pois não possuem relação funcional com a medida, ou seja, são imprevisíveis. Os erros sistemáticos podem ser modelados pois se sabe que eles sempre acontecem. Desse modo, é possível prever seu comportamento e assim minimizar sua atuação sobre as observações.

A Tabela 1 apresenta todos os erros que estão presentes nas observações GNSS, sendo que alguns deles podem ser reduzidos por modelos matemáticos. As marés terrestres, cargas oceânicas e movimento do polo não são erros e sim efeitos geodinâmicos que devem ser modelados e corrigidos para posicionamentos de alta precisão (MONICO, 2008).

Tabela 1- Fonte e efeitos dos erros envolvidos no GNSS

Fontes	Erros
Satélite	Erro de Órbita
	Erro do Relógio
	Relatividade
	Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite
	Centro de fase da antena do satélite
	Fase Wind-sup
Propagação do sinal	Refração Troposférica
	Refração Ionosférica
	Perda de ciclos
	Multicaminho
	Rotação da terra
Receptor/Antena	Erro do relógio
	Erro entre canais
	Centro de fase da antena do receptor
	Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor
	Fase Wind-sup
Estação	Erro nas coordenadas
	Multicaminho
	Maré terrestre
	Movimento do polo
	Carga oceânica
	Pressão da atmosfera

Fonte: MONICO (2008).

A magnitude que um erro residual pode incidir sobre uma observação pode ser analisada pela medida de distância entre o satélite e o receptor, ou seja, a pseudodistância. Quando todas essas contribuições são unidas é determinado o Erro Equivalente de Distância (UERE - *User Equivalent Range Error*) esse erro pode ser dividido em duas partes: o *Signal-in-Space (user) Range Error* (SISRE), que está relacionado com o segmento de controle e contempla erros referentes à órbita e relógios do satélite, e o *User Equipment Error* (UEE), que são contribuições resultantes do equipamento do usuário e atmosfera. O UERE pode ser obtido pela equação 14 (LANGLEY; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

$$UERE = \sqrt{(SISRE)^2 + (UEE)^2} \quad (14)$$

Na Tabela 2 são apresentadas as contribuições de cada erro na pseudodistância, podendo se observar que a maior fonte do UERE é referente à ionosfera e ao multicaminho.

Tabela 2 - Contribuição dos erros GNSS na pseudodistância

Fonte de erro	Contribuição 1σ (m)
<i>Signal-in-space (user) Range Error</i> (SISRE)	
Erro da órbita do satélite	0,2 – 1,0
Erro no relógio do satélite	0,3 – 1,9
Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite	0,0 – 0,2
<i>User Equipment Error</i> (UEE)	
Atraso Ionosférico não modelado	0,0 – 5,0
Atraso Troposférico não modelado	0,2
Multicaminho	0,2 – 1,0
Ruídos do receptor	0,1 – 1,0
UERE	0,5 – 6,0

Fonte: Adaptado do Teunissen (2017, p.9).

4.3.3 Técnicas de Posicionamento com GNSS

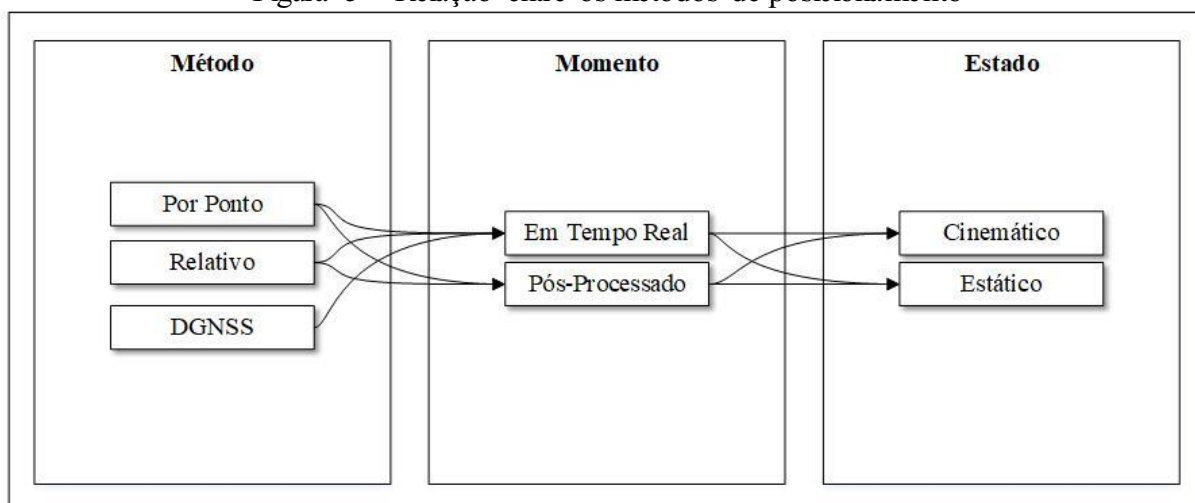
As coordenadas de um ponto na superfície terrestre podem ser obtidas por três métodos de posicionamento, por ponto, relativo e diferencial (DGNSS) (FAZAN, 2010). No posicionamento por ponto, as coordenadas estão relacionadas ao geocentro, já no relativo ou no diferencial as coordenadas estão associadas a um outro ponto materializado, denominado de estação base ou de referência.

Os três métodos possuem dois momentos em que essas coordenadas podem ser obtidas, por posicionamentos em tempo real e pós-processado. O primeiro refere-se as coordenadas que

são obtidas durante a coleta de observações, no segundo, trata-se de obter coordenadas no processamento após finalizada a coleta de observações. A utilização do método mais adequado depende muito do projeto que será realizado, nesse trabalho as coordenadas serão obtidas no pós-processamento.

O posicionamento pode ser dividido, também, em estático e cinemático. No primeiro, a coleta de observações é realizada com o receptor parado sobre o ponto de interesse. Destaca-se que esse método tende a proporcionar coordenadas altamente precisas. No segundo, a coleta de observações é realizada com o receptor em movimento sem desligar o equipamento. A Figura 5 apresenta as relações que podem ser obtidas em cada método.

Figura 5 - Relação entre os métodos de posicionamento



Fonte: Adaptado de Fazan (2010, p.51).

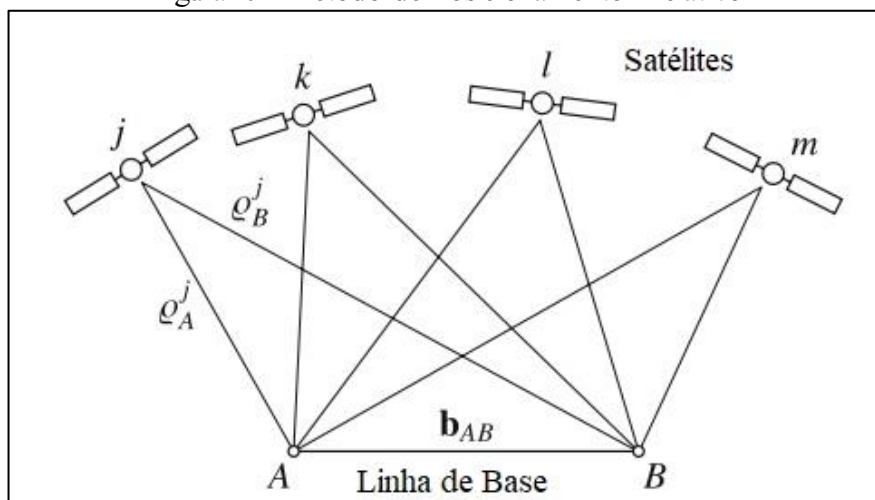
4.3.3.1 Posicionamento Relativo

O posicionamento relativo consiste na utilização de dois ou mais receptores rastreando simultaneamente dois ou mais satélites. Pela simultaneidade de observações é o método que possui melhor acurácia, pois o modelo matemático envolvido proporciona a eliminação ou atenuação de erros sistemáticos que são comuns entre os receptores por meio das duplas diferenças.

A dupla diferença (DD) é a diferença entre duas simples diferenças, entre dois receptores rastreando os mesmos satélites (Figura 6). Nos processamentos de duplas diferenças são usados a pseudodistância e a fase da onda portadora a fim de melhorar os resultados e minimizar os erros sistemáticos (refração ionosférica e Troposférica, erro das orbitas dos satélites e o erro do relógio dos receptores).

Os satélites representados na Figura 6 pelas letras j, k, l e m, mandam o sinal para os receptores A e B que forma um vetor que é denominado de linha de base, ela pode ser curta ou longa. A linha de base é considerada curta se a distância entre os dois receptores for menor que 10 km, pois os efeitos da ionosfera para distâncias maiores necessitam ser modelados. IBGE (2017).

Figura 6 - Método de Posicionamento Relativo



Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008, p.173).

Segundo Monico (2008) existem 3 tipos de métodos de posicionamento relativo, sendo que o cinemático pode ser realizado de outras formas a depender da técnica usada.

- Estático;
- Estático-Rápido;
- Cinemático;
 - Semicinemático;
 - Cinemático Pós-processado;
 - Cinemático em Tempo Real (RTK);
 - Cinemático em redes.

4.3.3.2 Posicionamento Relativo Estático

Nesse método a observável adotada é a dupla diferença da fase de batimento da onda portadora, também podendo ser empregada a DD das pseudodistâncias. As duplas diferenças de pseudodistância podem ser utilizadas, mas estas não agregam melhorias significativas para o método. Porém, as pseudodistâncias devem ficar disponíveis para que sejam empregadas no

pré-processamento para calcular o erro do relógio do receptor e calcular o instante aproximado de transmissão do sinal pelo satélite (MONICO, 2008). O método consiste em realizar observações com dois ou mais receptores rastreando os mesmos satélites por um longo período de tempo.

O tempo mínimo de coleta no relativo estático é de 20 min e pode durar várias horas em função do comprimento da linha de base e da precisão que se deseja obter. Na Tabela 3 demonstra a relação do tempo em função da distância entre os receptores e precisão.

Tabela 3 - Estimativa de precisão para o método do posicionamento relativo estático

Linha de Base	Tempo Mínimo	Observáveis	Precisão
00 - 05 km	05-10 min	L1 ou L1/L2	5-10 mm + 1ppm
05 - 10 km	10-15 min	L1 ou L1/L2	5-10 mm + 1ppm
10 - 20 km	10-30 min	L1 ou L1/L2	5-10 mm + 1ppm
20 - 50 km	02-03 h	L1/L2	5mm + 1ppm
50 - 100 km	Mínimo 03 h	L1/L2	5mm + 1ppm
>100 km	Mínimo 04 h	L1/L2	5mm + 1ppm

Fonte: Adaptado do IBGE (2017, p.22).

Devido a implantação da RBMC, é possível ir a campo com apenas um receptor e formar uma linha de base com as estações de referências. Essas estações entrarão na solução como ponto de controle, ou seja, com as coordenadas conhecidas.

Este trabalho foi realizado utilizando o método do posicionamento relativo estático em base curta, pois os erros de órbita dos satélites, erro dos relógios (satélite e receptor), ionosfera e troposfera podem ser atenuados ou eliminados, sendo possível obter precisão milimétrica.

4.4 Ajustamento de Observações

Todas as observações coletadas em campo possuem erros, eles podem ocorrer por falha humana, pela imprecisão do equipamento ou mesmo por fatores ambientais. Deste modo, é impossível obter um valor exato para os parâmetros de interesse diante vários erros que podem acontecer. Ao realizar apenas uma medida não é possível observar um se ela está eivada com erros que comprometam a qualidade do processo de cálculo, tendo em vista que não existirá outra para comparar; Portanto, a redundância é fundamental para se proceder com processo de controle de qualidade.

O ajustamento de observações é dividido em duas etapas quando possuímos observações diretas, onde as próprias grandezas são as incógnitas e as observações indiretas, quando tais

incógnitas se relacionam através de funções conhecidas (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

O método paramétrico para modelos lineares foi empregado nesse trabalho, pois as observações indiretas se vinculam aos parâmetros a serem calculados por meio de um modelo matemático linear (Equação 15) (GEMAEL, 1999).

Sejam:

$$L_a = F(X_a) \quad (15)$$

L_a = vetor das observações ajustadas;

X_a = Vetor dos parâmetros Ajustados;

F = Função matemática não linear;

O vetor dos parâmetros ajustados é obtido por meio da expressão 16, onde é realizada a

$$X_a = (A^T P A)^{-1} (A^T P L_b) \quad (16)$$

Onde A é matriz design de ordem (n x u), com n sendo o número de observações e u, o número de parâmetros, P é matriz peso de ordem (n x n) e L_b que é o vetor das observações. Posteriormente a obtenção dos parâmetros ajustados, devemos estimar as precisões dos parâmetros, sendo assim obtemos a MVC dos parâmetros ajustados por meio da equação 17.

$$\sum X_a = \sigma_0^2 (A^T P A) \quad (17)$$

O fator de variância a priori (σ_0^2) pode ser estimado sem causar prejuízo as observações e parâmetros, mas influencia na matriz de variância e covariância. Ao final do ajustamento devemos calcular o valor da variância a posteriori (equação 18), com o intuito realizar o controle de qualidade do ajustamento.

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T P v}{n-u} \quad (18)$$

Com objetivo de verificar a qualidade do ajustamento podemos comparar o valor do σ_0^2 com o $\hat{\sigma}_0^2$ para verificar se há discrepância entre o valor adotado no início do ajustamento e o valor encontrado no final. Essa comparação pode ser realizada por meio de um teste de hipótese composta que é quando temos hipóteses formuladas sobre a média populacional, pois a função

de densidade de probabilidade da variável aleatória não está completamente especificada para uma hipótese alternativa (Klein, 2011).

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \quad (19)$$

$$H_1 : \sigma_0^2 > \hat{\sigma}_0^2 \quad (20)$$

Se a hipótese nula ou alternativa forem de hipóteses compostas, pelo critério do teste da razão de verossimilhança, reduz a probabilidade de existir erro do tipo 2. (Klein, 2011)

A hipótese básica (equação 19) não é rejeitada, ao nível de significância α se:

$$\chi_{v, \frac{\alpha}{2}}^2 < \chi^{*2} < \chi_{v, 1 - \frac{\alpha}{2}}^2 \quad (21)$$

Caso contrário a hipótese básica é rejeitada e o ajustamento é recusado.

Onde:

$$\chi^{*2} = \frac{v^T B v}{\sigma_0^2} \quad (22)$$

4.5 Teste de Congruência Global

Com o intuito de verificar estatisticamente a existência de deslocamentos, é realizado um teste estatístico baseado no teste F de Fisher-Snedecor. Esse teste é denominado de Teste de Congruência Global, que é capaz de identificar a ocorrência de deslocamento entre duas épocas distintas (SUCI; FAGGION, 2012).

A hipótese nula e alternativa aplicada ao Teste de Congruência Global para verificar se um ponto se deslocou em duas épocas distintas é dada pela equação 23. Onde X_i e X_j (equações 24 e 25) são vetores com coordenadas tridimensionais (FAZAN, 2010).

$$H_0 : E\{d\} = E\{X_i - X_j\} = 0 \quad (23)$$

$$H_1 : E\{d\} \neq 0$$

$$X_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$X_j = \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} \quad (25)$$

A matriz de variância-covariância (MVC) (expressões 26 e 27) das coordenadas dos vetores nas épocas i e j são determinados no processamento da linha de base (FAZAN, 2010).

$$\Sigma X_i = \begin{bmatrix} \sigma_{x_i}^2 & \sigma_{x_i y_i} & \sigma_{x_i z_i} \\ \sigma_{y_i x_i} & \sigma_{y_i}^2 & \sigma_{y_i z_i} \\ \sigma_{z_i x_i} & \sigma_{z_i y_i} & \sigma_{z_i}^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\Sigma X_j = \begin{bmatrix} \sigma_{x_j}^2 & \sigma_{x_j y_j} & \sigma_{x_j z_j} \\ \sigma_{y_j x_j} & \sigma_{y_j}^2 & \sigma_{y_j z_j} \\ \sigma_{z_j x_j} & \sigma_{z_j y_j} & \sigma_{z_j}^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

O possível deslocamento (expressão 28) é obtido por:

$$d = X_i - X_j \quad (28)$$

E a MVC do deslocamento é obtida pela equação 29 (FAZAN, 2010).

$$\Sigma d = \Sigma X_i + \Sigma X_j \quad (29)$$

A covariância das coordenadas entre as épocas i e j no ponto pode ser calculada pela equação 30 (FAZAN, 2010).

$$\sigma_{x_{ij}}^2 = \frac{r_i \cdot \sigma_{x_i}^2 + r_j \cdot \sigma_{x_j}^2}{r_{ij}} \quad (30)$$

Onde:

$\sigma_{x_i}^2$ e $\sigma_{x_j}^2$ são as variâncias a posteriori das coordenadas no ponto desejado;

r_i e r_j são os graus de liberdade de cada época;

r_{ij} é o grau de liberdade da solução geral, onde pode ser obtido pela expressão 31.

$$r_{ij} = r_i + r_j \quad (31)$$

Para aplicar o teste F, deve-se calcular a estatística F_c (valor crítico) a partir das equações 32 e 33, conforme (FAZAN, 2010):

$$F_c = \frac{\Omega}{h\sigma_{x_{ij}}^2} \quad (32)$$

$$\Omega = d^t \cdot \sum d^{-1} \cdot d \quad (33)$$

Onde:

h : é característica de *rank* da $\sum d$.

Por fim a verificação da ocorrência de deslocamento é realizada confrontando F_c com o valor crítico da distribuição F a um determinado nível de significância (α) (FAZAN, 2010). A hipótese nula é aceita se $F_c \leq F_{\alpha, h, r}$.

A não rejeição da hipótese básica (H_0) é que não ocorreu deslocamento. A hipótese alternativa (H_1) é de que houve deslocamento, sendo descrita como rejeitado (RE).

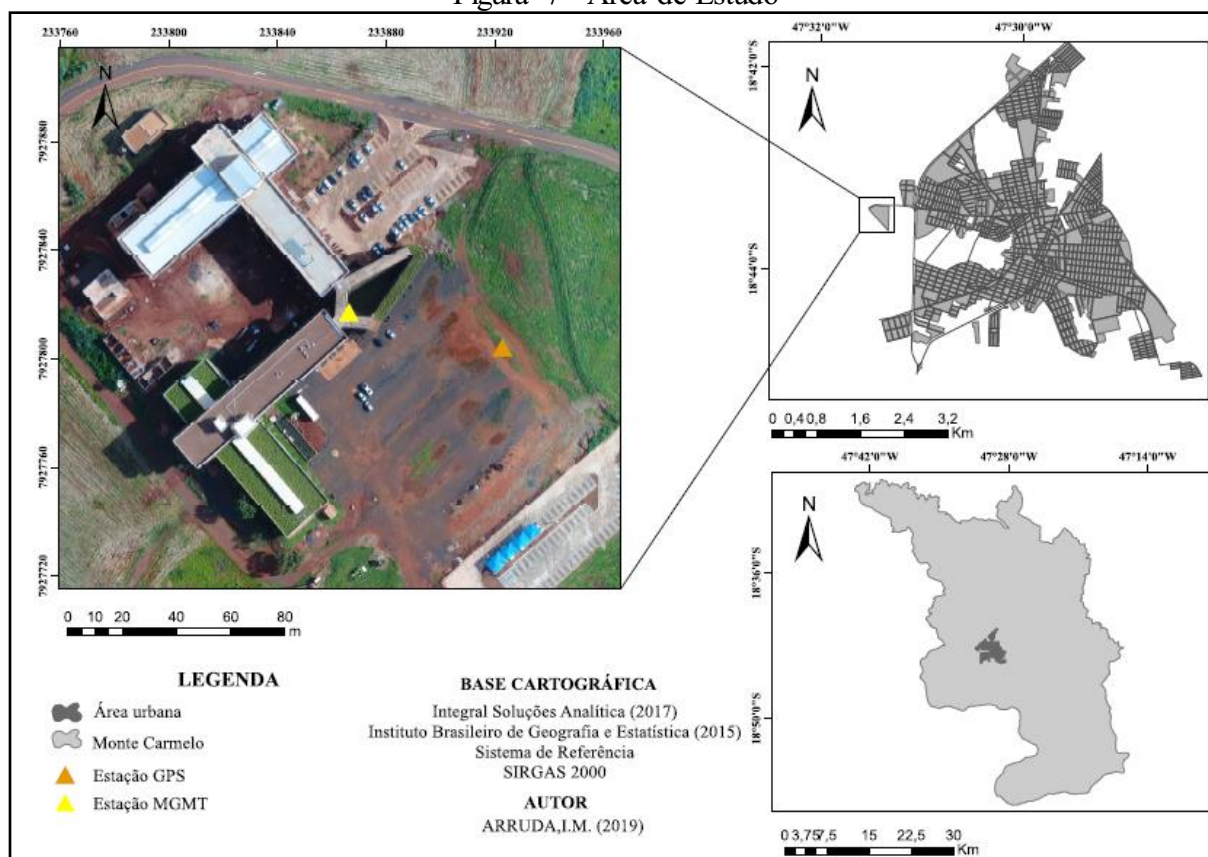
Quando rejeitamos uma hipótese nula verdadeira, temos o erro do tipo 1. E quando não rejeitamos um H_0 falsa é denominado de erro tipo 2.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

O presente trabalho ocorreu na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) no campus Araras, que fica localizado no município de Monte Carmelo - MG. A Figura 7 mostra a localização do campus e onde se situa a estação da RBMC e do marco de centragem forçada, ambas representadas no mapa pelo símbolo triângulo com cores diferentes, amarelo para a estação da RBMC e laranja para o marco. A distância inclinada entre os dois é de 58,23 m.

Figura 7 - Área de Estudo



Fonte: O autor.

5.2 Material

Foi utilizado um receptor de dupla frequência L1/L2 da marca japonesa Topcon modelo Hiper V (Figura 8), que possui precisão de 3mm + 0,1 ppm para a componente horizontal e 3,5mm + 0,1 ppm para a componente vertical.

Os softwares empregados nesse trabalho foram o RTKlib que é um pacote de programas de código aberto para posicionamento por ponto preciso para sistema GNSS, Topcon Tools

programa de processamento da marca Topcon, capaz de realizar o tratamento de informações de receptores GNSS e estações totais, além de realizar desenhos em ambiente CAD (*computer-aided design*) e MatLAB programa interativo voltado ao cálculo numérico que integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos.

Figura 8 - Receptor Hiper V



Fonte: Site da Embratop³.

O dispositivo que simulou o deslocamento no eixo horizontal, foi desenvolvido para esse projeto. Ele possui 30 cm de comprimento por 30 cm de altura; uma barra roscada de ½ polegada com suporte para encaixar o receptor se movimentará no eixo horizontal, portanto criando um deslocamento. O equipamento foi desenvolvido para ser inserido no marco de centragem forçada, pois ele ficou fixo durante os dias de levantamento. A Figura 9 apresenta o dispositivo montado em campo.

Figura 9 - Dispositivo de simulação



Fonte: O autor.

³ Disponível em: < <https://www.embratop.com.br/produto/topcon-hiper-v/>>. Acesso em 28 de abril de 2019

A fim de garantir que a medidas dos deslocamentos simulados de todos os dias sejam iguais, foi empregado um paquímetro digital de 150 mm com tolerância de 0,01 mm (Figura 10) para realizar o deslocamento do receptor na barra de simulação.

Figura 10 - Paquímetro Digital 150 mm

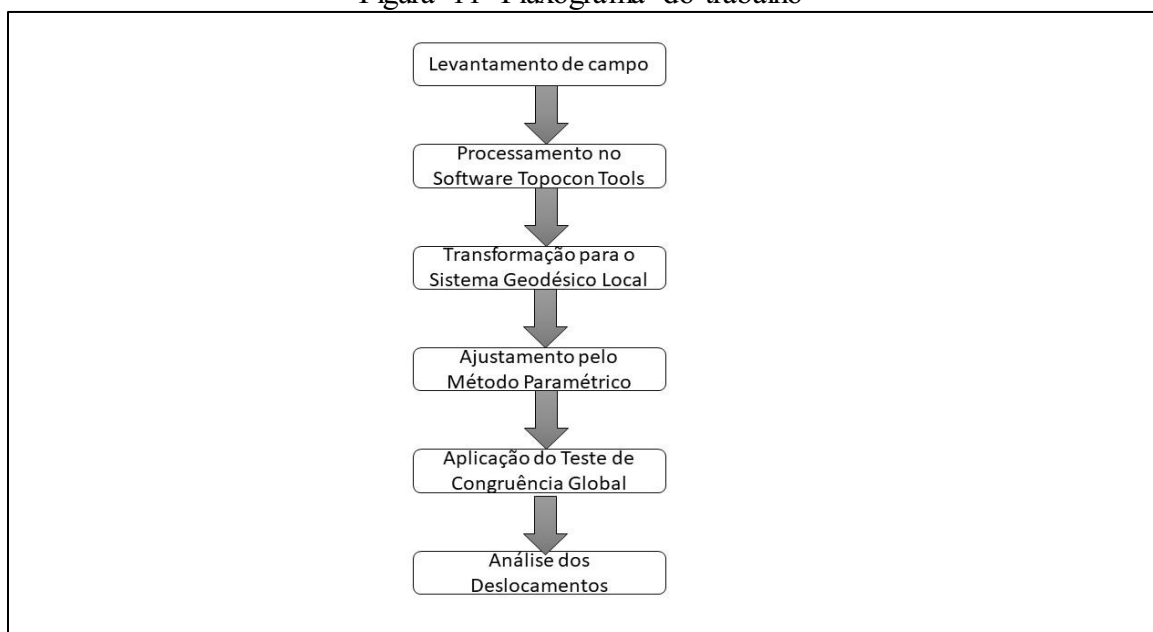


Fonte: Site da lojas americanas⁴

5.3 Metodologia

O fluxograma (Figura 11) foi desenvolvido para apresentar a sequência lógica do trabalho. As etapas descritas foram seguidas visando detectar o deslocamento horizontal com o receptor GNSS nas distâncias propostas.

Figura 11- Fluxograma do trabalho



Fonte: O autor.

⁴ Disponível em <<https://www.americanas.com.br/produto/14354350/paquimetro-digital-em-aco-inox-150-mm-6-com-estojo-316119-mtx>>. Acesso em: 28 de abril de 2019

5.3.2 Levantamento de campo

Cinco dias de levantamento foram realizados, os três primeiros foram feitos no mês de julho nos dias 8, 9 e 10 (Solstício), os outros dois levantamentos foram feitos no mês de outubro nos dias 12 e 13 (Equinócio). Em julho os dias foram escolhidos pela movimentação de veículos próxima ao experimento, no período de outubro o levantamento foi realizado no final de semana sem a presença de veículos.

Cada levantamento teve início às 8h e terminou por volta de 15h30, totalizando 7 horas e 30 minutos de rastreamento.

Cinco posições sobre o dispositivo de simulação foram definidas, sendo elas: 0 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mm e 25 mm. Um rastreamento de 30 minutos foi realizado 3 vezes em cada dia e cada posição com o intuito de se obter redundância, resultando em um total de 15 conjuntos de coordenadas por dia. O intervalo de coleta foi de 15 segundos e com máscara de elevação de 15°.

As Figuras 12A, 12B, 12C, 12D e 12E apresentam com os deslocamentos foram realizados e controlados em campo.

Figura 12 - Medição dos deslocamentos em campo



A



B



C



D



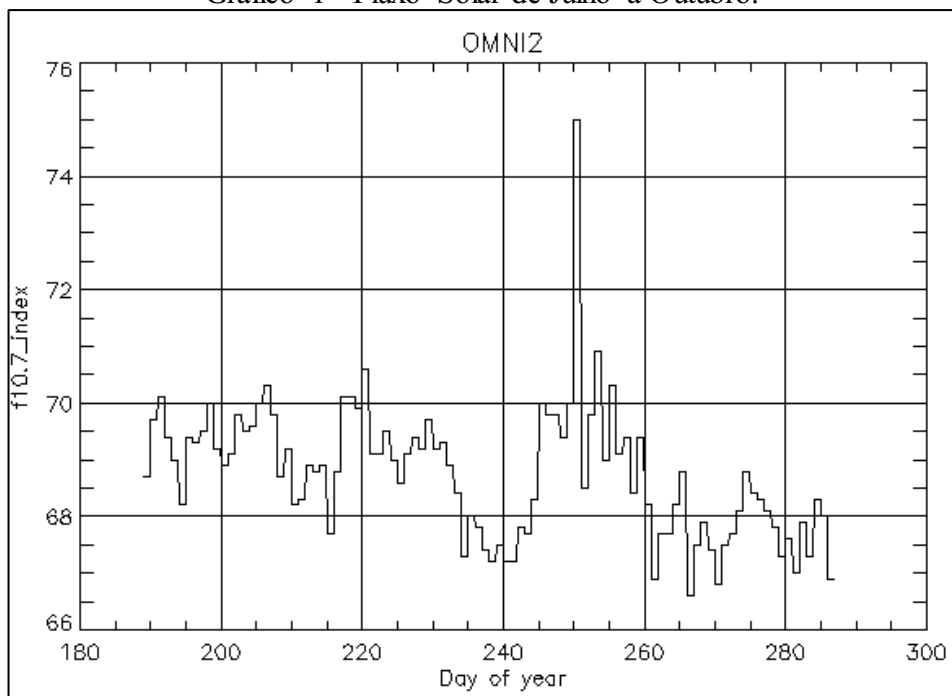
E

Fonte: O autor.

Três rastreios foram realizados no mês de julho e outros dois no mês de outubro, a fim de verificar a influência da atividade solar, foi gerado um Gráfico 1 que contém o índice que mede a radiação solar com comprimento de onda de 10,7cm. Analisando o Gráfico 1 podemos observar que radiação solar durante os três dias (189, 190 e 191) de no mês de julho, foi maior que os dias (285 e 286) do mês de outubro.

O sol ficou mais ativo durante os levantamentos no mês de julho, portanto provocando uma quantidade maior de densidade de elétrons na ionosfera, o que pode ocasionar um maior atraso do sinal do satélite para o receptor

Gráfico 1 - Fluxo Solar de Julho a Outubro.



Fonte: Site Goddard Space Flight Center⁵.

No Tabela 4 apresenta o atraso tropoférico hidrostático e úmido, esses valores podem influenciar na detecção dos deslocamentos. O valor apresentado no Tabela 2 é a média dos valores no instante em que o levantamento foi realizado. Na componente hidrostática temos uma diferença de 1 cm do mês de julho para o mês de outubro. Na componente úmida o dia 12 de outubro possui o maior valor que é de 0,18 m esse, valor alto reflete a quantidade alta de vapor de água de água na atmosfera.

⁵ Disponível em < <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> > Acesso em 21/11/2019

Tabela 4 - Atraso Tropoférico

	Atraso tropoférico seco (m)	Atraso Tropoférico úmido (m)	Atraso Tropoférico Total (m)
08/07/2019 -188	2,08	0,15	2,23
09/07/2019 - 189	2,08	0,18	2,26
10/07/2019 -190	2,09	0,06	2,15
12/10/2019 - 285	2,09	0,08	2,16
13/10/2019 -286	2,09	0,17	2,25

Fonte: O autor.

No software RTKlib foram gerados os gráficos de multicaminho, a fim de verificar se houve influência nos resultados obtidos, tendo em vista que os levantamentos no mês de julho havia a presença de diversos carros próximos ao experimento como podemos observar na Figura 13. Já no mês de outubro os levantamentos foram feitos no final de semana mais sem a presença de veículos, mas, com uma grande poça de água próxima ao experimento (Figura 13), devido às chuvas ocorridas durante o período.

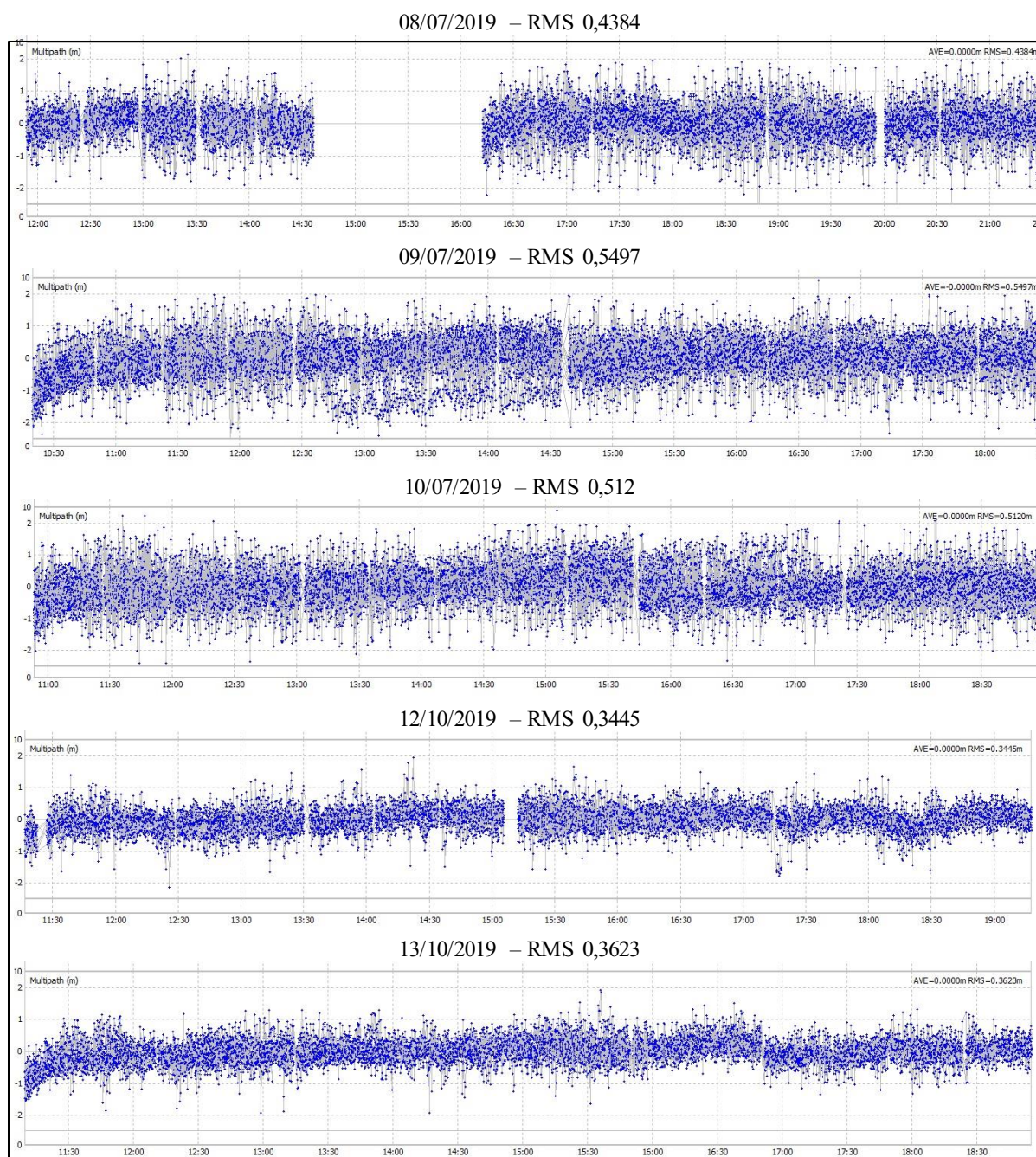
Figura 13- Épocas de levantamento

Julho 2019**Outubro 2019**

Fonte: O autor.

A Figura 14 apresenta o multicaminho obtido durante as sete horas e 30 minutos de rastreo nos dias dos levantamentos.

Figura 14 - Multicaminho



Fonte: O autor.

O desvio padrão (σ) do multicaminho obtido no dia 08 de julho é 0,4384 m. Analisando a Figura 14 podemos observar uma interrupção nos valores isso se deve à neste dia o equipamento ter ficado sem bateria nesse período.

Dentre os três levantamentos realizados no mês de julho o sigma do multicaminho no dia 09 foi de 0,5497 sendo o maior encontrado para o período, uma quantidade de carros maior pode ter ocasionado um desvio padrão maior que os demais. O sigma de 0,5120 m para o dia 10, foi um pouco mais próximos do dia 09 de julho. O volume de carros pode ter influenciado no valor.

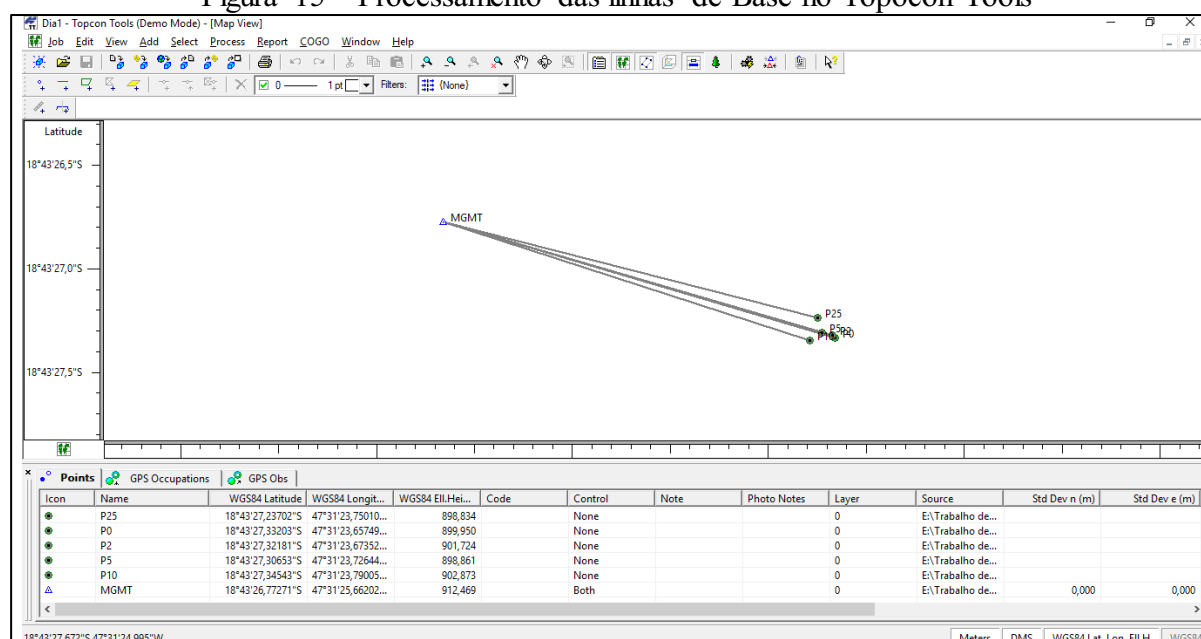
O desvio padrão de 0,3445 m para o multicaminho no período de outubro sem a presença de veículos e apenas poças de água próximas, ressalta que as superfícies metálicas tendem a interferir mais no multicaminho. O sigma de 0,3623 m no dia 13/10/2019, é bem menor que os valores encontrados para o período de julho com carros, então podemos inferir que superfícies metálicas refletoras interferem mais que água acumulada próxima ao experimento.

5.3.3 Processamento dos dados

Os dados coletados durante o levantamento de campo foram processados no software comercial *Topocon Tools* versão 8.2.3. A estação da RBMC de Monte Carmelo (MGMT) foi usada como referência para criar linhas de base com os pontos materializados pelas posições do receptor na barra de simulação. Os dados coletados foram processados usando apenas a L1, devido ao curto comprimento da linha (58,23 m) de base. As informações da órbita do satélite, ou seja, efemérides empregas no trabalho foram as transmitidas.

A Figura 15 apresenta, as linhas de base processadas em relação a estação de referência (MGMT).

Figura 15 – Processamento das linhas de Base no Topocon Tools



Fonte: O autor.

Três processamentos foram realizados para cada dia, com o intuito de ajustar e prover apenas uma única MVC para cada conjunto de ponto.

A Tabela 5 exemplifica como foi dividido o processamento e apresenta as coordenadas cartesianas geocêntricas obtidas para o dia 08 de julho. Os demais dias mantiveram o mesmo padrão de processamento.

Tabela 5 - Processamento Topocon Tools 08/07/2019

1 Processamento			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
P0	4081123,611	-4457396,266	-2034751,227
P2	4081123,610	-4457396,267	-2034751,227
P5	4081123,612	-4457396,273	-2034751,225
P10	4081123,610	-4457396,275	-2034751,220
P25	4081123,605	-4457396,281	-2034751,208
2 Processamento			
P0	4081123,613	-4457396,267	-2034751,232
P2	4081123,608	-4457396,266	-2034751,228
P5	4081123,608	-4457396,270	-2034751,225
P10	4081123,609	-4457396,273	-2034751,221
P25	4081123,604	-4457396,280	-2034751,209
3 Processamento			
P0	4081123,611	-4457396,268	-2034751,230
P2	4081123,610	-4457396,266	-2034751,228
P5	4081123,611	-4457396,271	-2034751,228
P10	4081123,608	-4457396,273	-2034751,222
P25	4081123,602	-4457396,277	-2034751,208

Fonte: O autor.

Então após o processamento foi obtido 15 conjuntos de coordenadas e 15 matrizes de variância e covariância.

5.3.4 Transformação de coordenadas geodésicas para topográficas locais

As coordenadas geodésicas são curvilíneas o que impossibilita a medição de deslocamentos planimétricos, portanto tais coordenadas foram convertidas para um sistema de coordenadas geodésicas locais, sendo que a unidade de medida dessas últimas é o metro.

Essa conversão foi implementada no software MATLAB pelo autor. As equações de conversão do sistema geodésico para cartesiano local e a propagação de variância e covariância estão dispostas na seção 4.2.4. Cada posição terá uma coordenada geodésica local e sua MVC.

A origem do SGL foi definida como sendo a posição 0 mm sobre o dispositivo de simulação, possibilitando a melhor visualização dos deslocamentos.

5.3.5 Ajustamento de Observações - Método Paramétrico

O programa para realizar o ajustamento⁶, foi desenvolvido pelo autor, e possui como os parâmetros de entrada as coordenadas da posição, coordenadas da RBMC e a MVCs da posição.

O ajustamento nesse trabalho tem como objetivo obter apenas um único conjunto de coordenadas para cada posição com sua respectiva MVC, com a finalidade de realizar o TCG. A equação 34, apresenta o modelo linear do ajustamento para esse trabalho, então para cada posição 9 coordenadas (n) e deseja-se obter 3 parâmetros (u).

$$\begin{aligned}
 1 \text{ sessão} & \begin{cases} \Delta X_{\text{MMT}} - p = X_p - X_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \\ \Delta Y_{\text{MMT}} - p = Y_p - Y_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \\ \Delta Z_{\text{MMT}} - p = Z_p - Z_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \end{cases} \\
 2 \text{ sessão} & \begin{cases} \Delta X_{\text{MMT}} - p = X_p - X_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \\ \Delta Y_{\text{MMT}} - p = Y_p - Y_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \\ \Delta Z_{\text{MMT}} - p = Z_p - Z_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \end{cases} \\
 3 \text{ sessão} & \begin{cases} \Delta X_{\text{MMT}} - p = X_p - X_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \\ \Delta Y_{\text{MMT}} - p = Y_p - Y_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \\ \Delta Z_{\text{MMT}} - p = Z_p - Z_{\text{MMT}} - v_{p-\text{MMT}} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{34}$$

Para melhor entendimento, as etapas do ajustamento, foram realizadas para o ponto p onde p representa a posição (0 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mm e 25 mm), seguindo o mesmo raciocínio para os demais pontos. O vetor L_b é composto pelo ΔX , ΔY e ΔZ , a equação 35.

⁶ Os códigos Junto com os arquivos processados estão disponíveis em: < <https://drive.google.com/open?id=1ocAZkO9ZVJOLHOSkn4BtQr2129UFv> in >

$$\begin{array}{l}
1 \text{ sessão} \left\{ \begin{array}{l} \Delta X_{MGMT} - p \\ \Delta Y_{MGMT} - p \\ \Delta Z_{MGMT} - p \end{array} \right. \\
2 \text{ sessão} \left\{ \begin{array}{l} \Delta X_{MGMT} - p \\ \Delta Y_{MGMT} - p \\ \Delta Z_{MGMT} - p \end{array} \right. \\
3 \text{ sessão} \left\{ \begin{array}{l} \Delta X_{MGMT} - p \\ \Delta Y_{MGMT} - p \\ \Delta Z_{MGMT} - p \end{array} \right.
\end{array} \quad (35)$$

A matriz peso (P) é composta por uma matriz bloco diagonal, pois para cada sessão é gerado uma MVC do processamento. O fator de variância a priori (σ_0^2) foi definido como 1. A Equação 36 apresenta a matriz P.

$$\begin{bmatrix}
1/\sigma_x^2 & 1/\sigma_{xy} & 1/\sigma_{xz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1/\sigma_{yx} & 1/\sigma_y^2 & 1/\sigma_{yz} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1/\sigma_{zx} & 1/\sigma_{zy} & 1/\sigma_z^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1/\sigma_x^2 & 1/\sigma_{xy} & 1/\sigma_{xz} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1/\sigma_{yx} & 1/\sigma_y^2 & 1/\sigma_{yz} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1/\sigma_{zx} & 1/\sigma_{zy} & 1/\sigma_z^2 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\sigma_x^2 & 1/\sigma_{xy} & 1/\sigma_{xz} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\sigma_{yx} & 1/\sigma_y^2 & 1/\sigma_{yz} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\sigma_{zx} & 1/\sigma_{zy} & 1/\sigma_z^2
\end{bmatrix} \quad (36)$$

A matriz A ou desing é dada pelas derivadas parciais do modelo. A equação 37 apresenta como é formada a matriz desing (n x u).

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_0} \quad (37)$$

A representação da matriz A para a posição e exibida pela equação 38

$$\begin{array}{l}
1 \text{ sessão} \left\{ \begin{array}{l} \Delta X_{MGMT} - p \\ \Delta Y_{MGMT} - p \\ \Delta Z_{MGMT} - p \end{array} \right. \\
2 \text{ sessão} \left\{ \begin{array}{l} \Delta X_{MGMT} - p \\ \Delta Y_{MGMT} - p \\ \Delta Z_{MGMT} - p \end{array} \right. \\
3 \text{ sessão} \left\{ \begin{array}{l} \Delta X_{MGMT} - p \\ \Delta Y_{MGMT} - p \\ \Delta Z_{MGMT} - p \end{array} \right.
\end{array} \cdot \begin{array}{c} X_p \ Y_p \ Z_p \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \quad (38)$$

O vetor dos parâmetros ajustados é realizado pela equação 16.

5.3.5 Aplicação do Teste de Congruência Global

O teste de congruência global foi aplicado a partir de uma rotina computacional desenvolvida em Matlab pelo autor, que recebe como parâmetros de entrada as coordenadas do ponto de no instante i e outra coordenada no instante j , com suas respectivas MVCs (equação 29) e seu fator de variância a posteriori (equação 30), que foi calculado no ajustamento. Com esses parâmetros é possível calcular o valor da estatística F , denominada como F calculado

Segundo a hipótese formulada (expressão 23), se o valor de F_c for menor que o F tabelado ($F_{\alpha,h,r}$), o teste informa que o deslocamento verificado entre as duas coordenadas não foi significativo a um determinado nível de significância.

5.3.6 Análise dos deslocamentos

A primeira análise foi verificar a estabilidade do dispositivo de simulação pois em alguns levantamentos a mesma precisou ser retirada do local e inserida. Para tanto foi verificada a imobilidade empregando o TCG entre os dias de levantamento, essa análise foi feita com a posição de um dia para a mesma posição para o outro. Essa análise foi feita aplicando ao TCG para a mesma posição em dias diferentes.

A segunda e a terceira tiveram com objetivo avaliar o nível de significância mais adequado, para se detectar deslocamentos no tridimensional e no bidimensional. Os níveis de significância $(1 - \alpha)$ testados foram 0,01, 0,05, 0,2 e 0,32. O TCG nesse caso foi aplicado usando como referência a posição zero sobre a barra para as demais posições.

No deslocamento tridimensional para cada posição um conjunto de 9 coordenadas foram ajustadas para obter apenas 3 coordenadas precisas para cada posição. A aplicação do teste levou em consideração a variância a posteriori obtida no ajustamento e número dos graus de liberdade que foi de 6 e MVC de cada posição.

No deslocamento bidimensional foi necessário primeiro realizar a transformação de coordenadas para o geodésico local pois somente assim é possível separar a componente altimétrica das planimétricas. Com a retirada da componente vertical foi realizado o ajustamento das 6 coordenadas para obter 2 parâmetros ajustados. A aplicação do teste se deu no modelo do tridimensional.

A quarta análise foi avaliar o TCG com um número maior de redundância, portanto os resultados da terceira análise influenciam diretamente nessa análise. Os dias em que o TCG afirmou que não ocorreu movimentação do dispositivo foram unidos dobrando ao número de observações, sendo assim um novo ajustamento foi realizado para cada posição, a fim de aplicar o TCG para saber a quantidade de deslocamentos detectados. Um novo ajustamento foi realizado unindo as coordenadas de dois dias então a quantidade de observações dobrou, então foram 18 observações para cada posição para obter apenas 3 parâmetros com suas respectivas MVC e fator de variância a posteriori, isso no tridimensional. No bidimensional primeiro foi empregado a conversão de coordenadas para o sistema geodésico local e posteriormente excluído a componente altimétrica, desta forma poder ajustar as observações que eram 12 para ter 2 coordenadas precisas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise de estabilidade do dispositivo de simulação

A Tabela 6, apresenta os resultados para verificar a estabilidade do dispositivo de simulação. A aceitação (AC) indica que não ocorreu movimentação no dispositivo entre os dias analisados e rejeição (RE), indica que ocorreu deslocamento. Observando a sexta coluna, verificamos que todos os pontos tiveram diferenças entre os dias. Na aplicação do TCG, o valor crítico (F_c) mostrou que quanto maior a diferença entre as coordenadas entre os dias verificados, seu valor será maior, deste modo fazendo com que o ponto seja rejeitado, indicando uma movimentação. Quando o valor crítico é inferior ao valor de referência ($F_{\alpha,h,r}$), temos uma aceitação, portanto temos um erro de 1 para os dias 09 e 10 de julho nos níveis de significância de 0,01, 0,05 e 0,2 e para os dias 12 e 13 de outubro ao nível de significância de 0,01.

Tabela 6 - TCG Análise de estabilidade do dispositivo de simulação

Ponto 0						
Dias	Fc	0,01	0,05	0,2	Diferença	
F, α ,h,r		5,9525	3,4903	1,8042	mm	$\sigma_{0_{ij}}^2$ m ²
Dia 08/07 – 09/07	13,785	RE	RE	RE	8,80	0,0034
Dia 08/07 – 10/07	8,0946	RE	RE	RE	6,70	0,0046
Dia 09/07 – 10/07	1,2949	AC	AC	AC	3,10	0,0040
Dia 12/10 – 13/10	5,3699	AC	RE	RE	5,20	0,0039
Ponto 2						
Dias	Fc	0,01	0,05	0,2	Diferença	
F, α ,h,r		5,9525	3,4903	1,8042	mm	$\sigma_{0_{ij}}^2$ m ²
Dia 08/07 – 09/07	23,0421	RE	RE	RE	8,00	0,0031
Dia 08/07 – 10/07	5,6929	AC	RE	RE	5,90	0,0086
Dia 09/07 – 10/07	1,9284	AC	AC	RE	6,10	0,0106
Dia 12/10 – 13/10	2,5392	AC	AC	RE	4,50	0,0031
Ponto 5						
Dias	Fc	0,01	0,05	0,2	Diferença	
F, α ,h,r		5,9525	3,4903	1,8042	mm	$\sigma_{0_{ij}}^2$ m ²
Dia 08/07 – 09/07	12,9189	RE	RE	RE	11,10	0,0067
Dia 08/07 – 10/07	6,5967	RE	RE	RE	9,60	0,0085
Dia 09/07 – 10/07	0,2587	AC	AC	AC	2,10	0,0113
Dia 12/10 – 13/10	0,7022	AC	AC	AC	2,26	0,0046
Ponto 10						
Dias	Fc	0,01	0,05	0,2	Diferença	
F, α ,h,r		5,9525	3,4903	1,8042	mm	$\sigma_{0_{ij}}^2$ m ²
Dia 08/07 – 09/07	52,2214	RE	RE	RE	10,90	0,0013
Dia 08/07 – 10/07	6,7386	RE	RE	RE	7,20	0,0061
Dia 09/07 – 10/07	2,3039	AC	AC	RE	5,00	0,0059
Dia 12/10 – 13/10	2,7263	AC	AC	RE	3,30	0,0027
Ponto 25						
Dias	Fc	0,01	0,05	0,2	Diferença	
F, α ,h,r		5,9525	3,4903	1,8042	mm	$\sigma_{0_{ij}}^2$ m ²
Dia 08/07 – 09/07	12,8865	RE	RE	RE	7,60	0,0076
Dia 08/07 – 10/07	9,8006	RE	RE	RE	6,90	0,0042
Dia 09/07 – 10/07	0,2983	AC	AC	AC	1,80	0,0051
Dia 12/10 – 13/10	0,7402	AC	AC	AC	2,20	0,0042

Fonte: O autor.

Observa-se que os dias mais estáveis a um nível de significância de 0,05 são os dias 9 e 10 de julho, pois todos os pontos foram aceitos pelo TCG. A Tabela 7 evidencia que para esses dias a média das diferenças foi a menor. Os outros dois dias que segundo o TCG não ocorreu movimentação foram os dias 12 e 13 de outubro a um nível de significância de 0,01, pois no

ponto 0 foi detectado deslocamento a um nível de significância de 0,05. Na Tabela 7 podemos observar que a média das diferenças foi próxima aos dias 9 e 10 de julho.

Tabela 7 - Média e desvio padrão das diferenças

	$\bar{X}$	σ	Máximo (mm)	Mínimo (mm)
Dia 08/07 – 09/07	8,80	1,39	11,10	7,60
Dia 08/07 – 10/07	6,69	1,24	9,60	5,90
Dia 09/07 – 10/07	3,10	1,67	6,10	1,80
Dia 12/10 – 13/10	3,42	1,19	5,20	2,20

Fonte: O autor.

6.2 Avaliação do nível de significância no tridimensional (3D) e bidimensional (2D)

Na análise para avaliar o nível de significância mais adequado, o número de rejeição foi determinado como o fator de escolha do nível de significância. Na Tabela 8 observa-se que o deslocamento realizado de 2 mm (3D e 2D) não foi detectado em 0,01 e 0,05 e no ponto 5 (3D e 2D) mm em 0,01. Nos pontos 2 mm e 5 mm, temos erro do tipo 2, pois uma aceitação foi confirmada pelo teste quando deveria ter sido rejeitada.

Com a retirada da componente altimétrica podemos observar que o valor do ômega (Ω), no 2D ficou menor em todas as posições, mesmo assim não foi uma redução suficiente para aumentar o valor crítico para rejeitar os 2 mm e 5 mm.

A partir do nível de significância de 0,2 a movimentação em todos os pontos foi detectada pelo TCG, deste modo o índice de 0,2 mostrou-se melhor que os demais para detectar os deslocamentos.

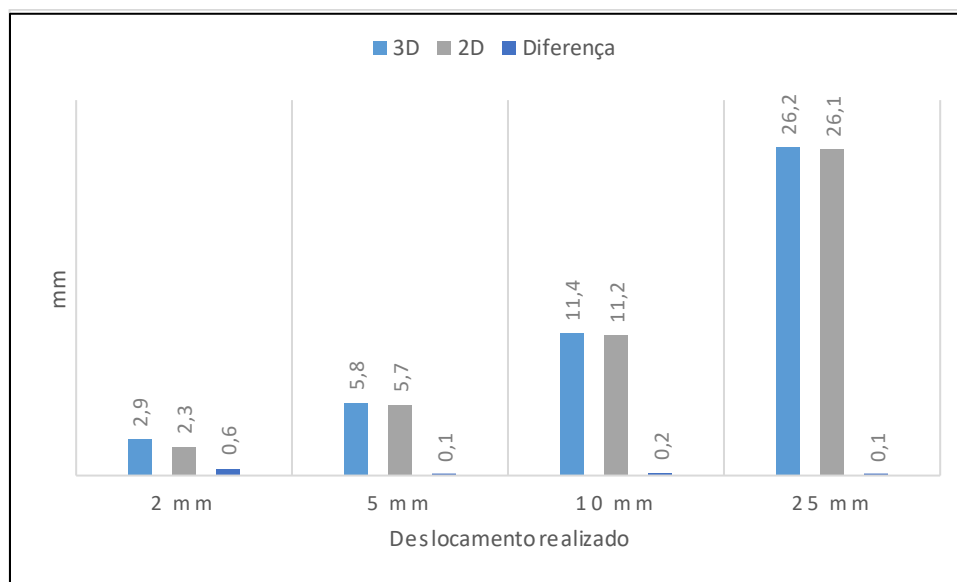
Tabela 8 – TCG 3D 08/07/2019

Desl realizado		3D				Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 (m ²)	Ω
Fc	0,01	0,05	0,2	0,32				
F, α , h, r	-----	5,9525	3,4903	1,8042	1,2984			
2 mm	1,95	AC	AC	RE	RE	2,9	0,0026	0,0149
5 mm	5,18	AC	RE	RE	RE	5,8	0,0039	0,0606
10 mm	34,04	RE	RE	RE	RE	11,4	0,0027	0,2803
25 mm	155,83	RE	RE	RE	RE	26,2	0,0032	1,4900
		2D				Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 (m ²)	Ω
Fc	0,01	0,05	0,2	0,32				
	-----	8,6491	4,4590	1,9814	1,3183			
2 mm	2,06	AC	AC	RE	RE	2,3	0,0031	0,0129
5 mm	6,15	AC	RE	RE	RE	5,7	0,0044	0,0543
10 mm	38,30	RE	RE	RE	RE	11,2	0,0033	0,2525
25 mm	208,84	RE	RE	RE	RE	26,1	0,0034	1,4277

Fonte: O autor.

No Gráfico 2, apresenta a diferença entre os deslocamentos no bidimensional para o tridimensional, observa-se que ocorreu uma melhora significativa de 0,6 mm para a posição 2 mm, deste modo não havendo uma melhora nos resultados do TCG.

Gráfico 2 - Diferença entre 3D e 2D – 08/07/2019



Fonte: O autor.

Na Tabela 9 ao analisarmos os deslocamentos pelo GPS, verifica-se que na posição 2 mm o valor encontrado no tridimensional de 1,9 ficou muito próximo (0,1 mm) do deslocamento realizado em campo, mas o TCG não conseguiu detectar o deslocamento em nenhum dos níveis de significância propostos (0,01, 0,05, 0,2 e 0,32). No bidimensional com a retirada da componente altimétrica teve uma piora na posição 2 mm, nas demais não ocorreram diferenças.

Ao aplicar o TCG, podemos observar que o deslocamento por GPS ficar muito próximo ao deslocamento realizado, não possível detectar seu deslocamento em nenhum dos níveis de significância. Na parte bidimensional o valor ficou mais longe do estabelecido na posição 2 mm, deste modo sua variância entre as épocas ficou mais baixa que no tridimensional, portanto aumentando o valor crítico para a posição que fez o ponto ser rejeitado. Nas posições 10 mm e 25 mm no 3D tiveram uma diferença de 1,2 mm e 1,4 mm acima do estabelecido, portanto sua variância entre as épocas é menor que as demais, resultando em um valor crítico maior, resultando na rejeição da posição.

Para o dia 09 de julho no tridimensional não foi possível detectar todos os deslocamentos, bidimensional consegui verificar a movimentação com índice de 0,32 onde sua região de rejeição é bem maior que os demais níveis.

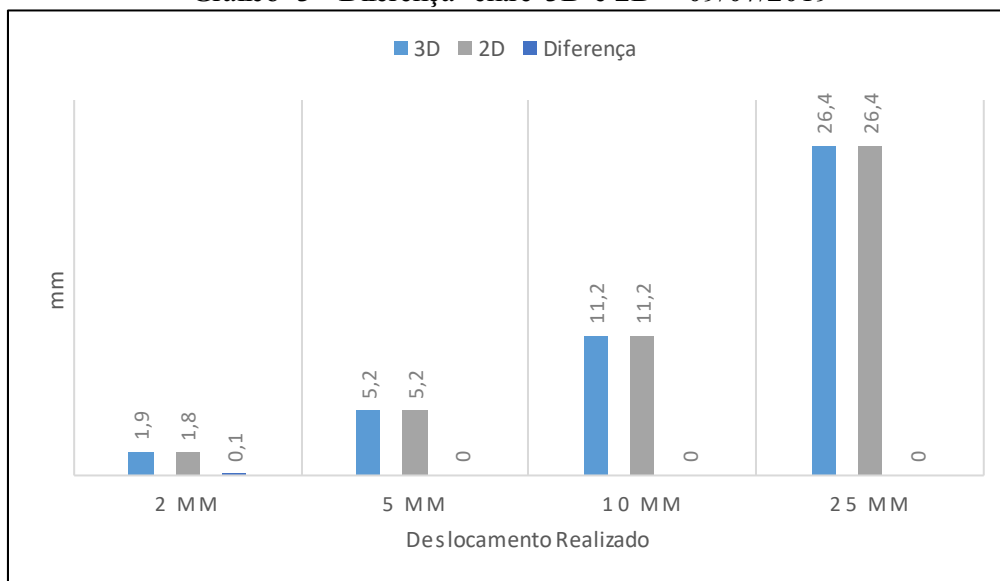
Tabela 9 – TCG 3D 09/07/2019

Desl realizado	Fc	0,01	0,05	0,2	0,32	Desl GPS (mm)	$\sigma_{0,ij}^2$ m ²	Ω
F, α ,h,r	-----	5,9525	3,4903	1,8042	1,2984			
3D								
2 mm	0,7361	AC	AC	AC	AC	1,9	0,0040	0,0088
5 mm	3,1723	AC	AC	RE	RE	5,2	0,0062	0,0591
10 mm	46,7523	RE	RE	RE	RE	11,2	0,0020	0,2789
25 mm	140,945	RE	RE	RE	RE	26,4	0,0036	1,5168
2D								
Desl realizado	Fc	0,01	0,05	0,2	0,32	Desl GPS (mm)	$\sigma_{0,ij}^2$ m ²	Ω
F, α ,h,r	-----	8,6491	4,4590	1,9814	1,3183			
2 mm	1,53	AC	AC	AC	RE	1,8	0,0029	0,0089
5 mm	5,42	AC	RE	RE	RE	5,2	0,0056	0,0601
10 mm	63,52	RE	RE	RE	RE	11,2	0,0021	0,2680
25 mm	234,41	RE	RE	RE	RE	26,4	0,0030	1,4160

Fonte: O autor.

No Gráfico 3, observa-se que não ocorreram diferenças entre o tridimensional e bidimensional, portanto a componente altimétrica não teve influência.

Gráfico 3 - Diferença entre 3D e 2D – 09/07/2019



Fonte: O autor.

A Tabela 10, o deslocamento por GPS no tridimensional para a posição 2 mm, teve um aumento de 1 mm sobre o deslocamento realizado, portando observando a variância entre as épocas foi de 0,01 m² sendo a maior para esse dia no tridimensional. A variância alta, é uma demonstração de que as observações tiveram resíduos mais altos que as demais posições. Na posição também observamos que uma diferença de 1,9 mm entre o deslocamento realizado para o GPS, deste modo sua variância sendo a segundo mais alta para o dia 10 de julho.

A retirada da componente altimétrica teve influência no TCG pois a posição 5 mm foi rejeitada no teste, nos níveis de significância de 0,01 e 0,05 no tridimensional ela foi aceita. Portanto nesse dia não tivemos um nível de significância que conseguisse detectar as movimentações propostas.

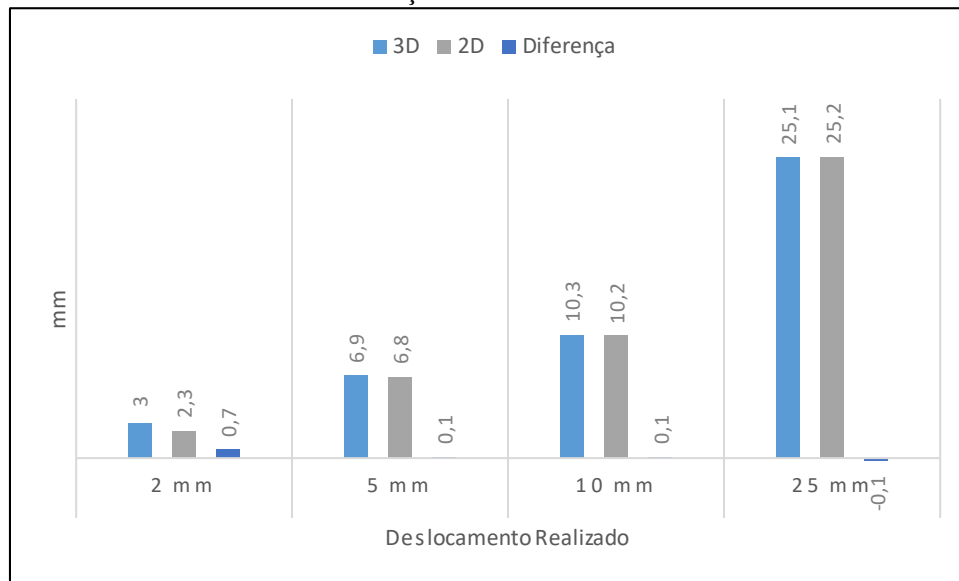
Tabela 10 - TCG 3D 10/07/2019

Desl realizado	Fc	0,01	0,05	3D				
				0,2	0,32			
F,α,h,r	-----	5,9525	3,4903	1,8042	1,2984	Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
2 mm	0,3774	AC	AC	AC	AC	3	0,010	0,0120
5 mm	2,9691	AC	AC	RE	RE	6,9	0,0092	0,0815
10 mm	7,3246	RE	RE	RE	RE	10,3	0,0079	0,1743
25 mm	87,3246	RE	RE	RE	RE	25,1	0,0055	1,4900
Desl realizado	Fc	0,01	0,05	2D				
				0,2	0,32			
F,α,h,r	-----	8,6491	4,4590	1,9814	1,3183	Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
2 mm	1,00	AC	AC	AC	AC	2,3	0,0034	0,0068
5 mm	18,99	RE	RE	RE	RE	6,8	0,0023	0,0863
10 mm	10,22	RE	RE	RE	RE	10,2	0,0076	0,1543
25 mm	129,65	RE	RE	RE	RE	25,2	0,0053	1,3664

Fonte: O autor.

No Gráfico 4, nota-se que para a posição 2 mm o deslocamento por GPS, teve uma melhora de 0,7 mm. Então a componente altimétrica teve uma influência maior para essa posição do que os dias 8 e 9 de julho.

Gráfico 4 - Diferença entre 3D e 2D – 10/07/2019



Fonte: O autor.

Na Tabela 11, foi aplicado o teste de congruência global para o 12 de outubro, no tridimensional e no bidimensional. Ao analisar a Tabela 11 no tridimensional, percebemos que os valores do deslocamento por GPS ficaram maiores que os do mês de julho. Podemos afirmar com base na Figura 14 que o multicaminho, para essa época foi menor que o mês de julho. O atraso troposférico total foi de 2,16 m sendo um valor menor que o mês de julho, o que também refuta que essa diferença entre deslocamento realizado e pelo GPS seja causada pela troposfera.

Na análise tridimensional, o nível de significância de 0,2 conseguiu detectar todos os as movimentações propostas. No bidimensional temos uma melhora dos deslocamentos pelo GPS nas posições 2 mm e 25 mm, mas na aplicação do TCG, não correram melhoras no número de detecções nos níveis de significância de 0,01 e 0,05. Uma melhora na variância da posição 2 mm foi notada, saiu de 0,0039 m² para 0,0031 m². Outra melhora foi no valor do ω que leva em seu cálculo o valor do deslocamento e da MVC do deslocamento sendo assim a os valores de ω no bidimensional são menores que no tridimensional, deste modo afirmamos que a componente altimétrica teve influência no valor dos deslocamentos e no TCG.

Tabela 11 - TCG 3D 12/10/2019

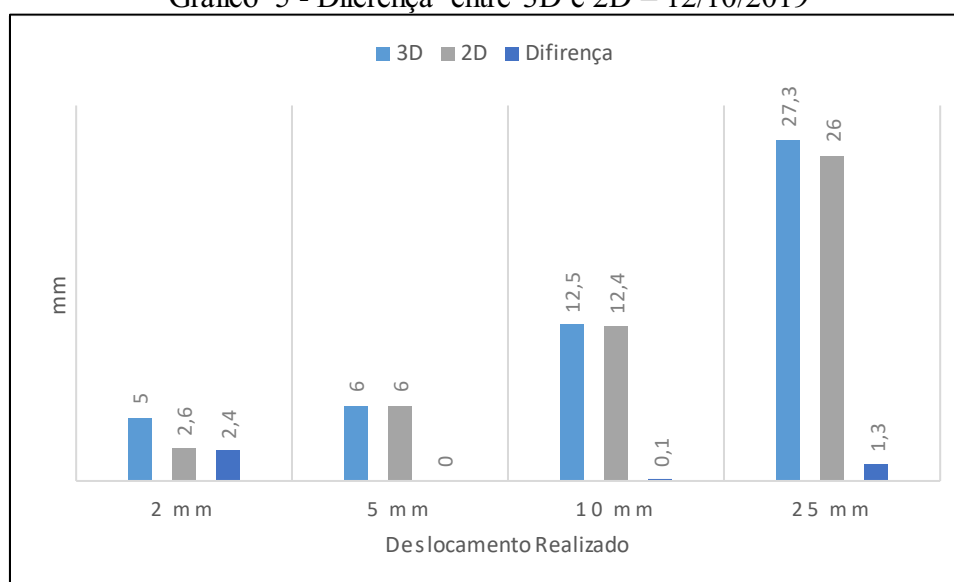
Desl realizado	Fc	3D				Desl GPS (mm)	$\sigma_{0,ij}^2$ m ²	Ω
		0,01	0,05	0,2	0,32			
F, α , h, r	-----	5,9525	3,4903	1,8042	1,2984			
2 mm	3,10	AC	AC	RE	RE	5	0,0039	0,0366
5 mm	3,54	AC	RE	RE	RE	6	0,0063	0,0668
10 mm	19,67	RE	RE	RE	RE	12,5	0,0051	0,3029
25 mm	84,00	RE	RE	RE	RE	27,3	0,0062	1,5600

Desl realizado	Fc	2D				Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
		0,01	0,05	0,2	0,32			
F, α , h, r	-----	8,6491	4,4590	1,9814	1,3183			
2 mm	2,45	AC	AC	RE	RE	2,6	0,0031	0,0154
5 mm	7,90	AC	RE	RE	RE	6	0,0042	0,0661
10 mm	41,03	RE	RE	RE	RE	12,4	0,0034	0,2808
25 mm	145,90	RE	RE	RE	RE	26	0,0046	1,4100

Fonte: O autor.

No Gráfico 5, nota-se que a componente altimétrica teve influência no deslocamento por GPS, as maiores diferenças foram na posição 2 mm e 25 mm.

Gráfico 5 - Diferença entre 3D e 2D – 12/10/2019



Fonte: O autor.

A Tabela 12, apresenta os resultados da aplicação do TCG, para último dia de levantamento, os valores do deslocamento realizados por GPS estão mais altos que os deslocamentos realizados em campo. A Figura 14 informa que o valor do multicaminho para o dia 13 de outubro, foi menor que os valores obtidos no mês de julho, portanto o multicaminho não foi a causa do aumento do valor do deslocamento calculado (Desl GPS). O valor do fluxo foi menor para o mês de outubro como apresenta a Figura 13. Já a Tabela 4 o atraso troposférico pode ter influenciado nos valores maiores que o mês de julho, pois o atraso troposférico total foi de 2,25 m o segundo maior valor entre todos os dias analisados.

Na Tabela 12, o TCG conseguiu detectar deslocamento no nível de significância de 0,05, tanto no tridimensional quando no bidimensional, mas o deslocamento GPS ficou acima do realizado foram os maiores valores encontrados de todos os dias.

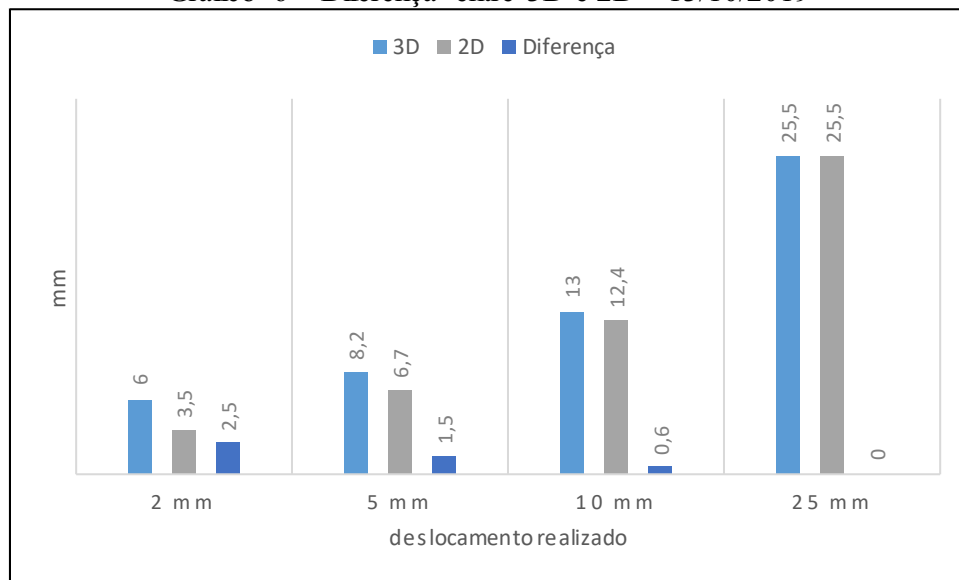
Tabela 12 - TCG 3D 13/10/2019

Desl realizado	Fc	3D				Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
		0,01	0,05	0,2	0,32			
F,α,h,r	-----	5,9525	3,4903	1,8042	1,2984			
2 mm	4,93	AC	RE	RE	RE	6	0,0030	0,044
5 mm	13,12	RE	RE	RE	RE	8,2	0,0022	0,0860
10 mm	70,81	RE	RE	RE	RE	13	0,0014	0,2945
25 mm	232,85	RE	RE	RE	RE	25,5	0,0018	1,2670
Desl realizado	Fc	2D				Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
		0,01	0,05	0,2	0,32			
F,α,h,r	-----	8,6491	4,4590	1,9814	1,3183			
2 mm	5,80	AC	RE	RE	RE	3,5	0,0020	0,0266
5 mm	38,11	RE	RE	RE	RE	6,7	0,0010	0,0766
10 mm	226,77	RE	RE	RE	RE	12,4	0,0006	0,2919
25 mm	1251,29	RE	RE	RE	RE	25,5	0,0004	1,2100

Fonte: O autor.

O Gráfico 6 apresenta a diferença entre o 3D e o 2D, podemos observar que ocorreram diferenças nas posições 2 mm, 5 mm e 10 mm. Então a componente altimétrica teve influência nos valores dos deslocamentos por GPS.

Gráfico 6 – Diferença entre 3D e 2D – 13/10/2019

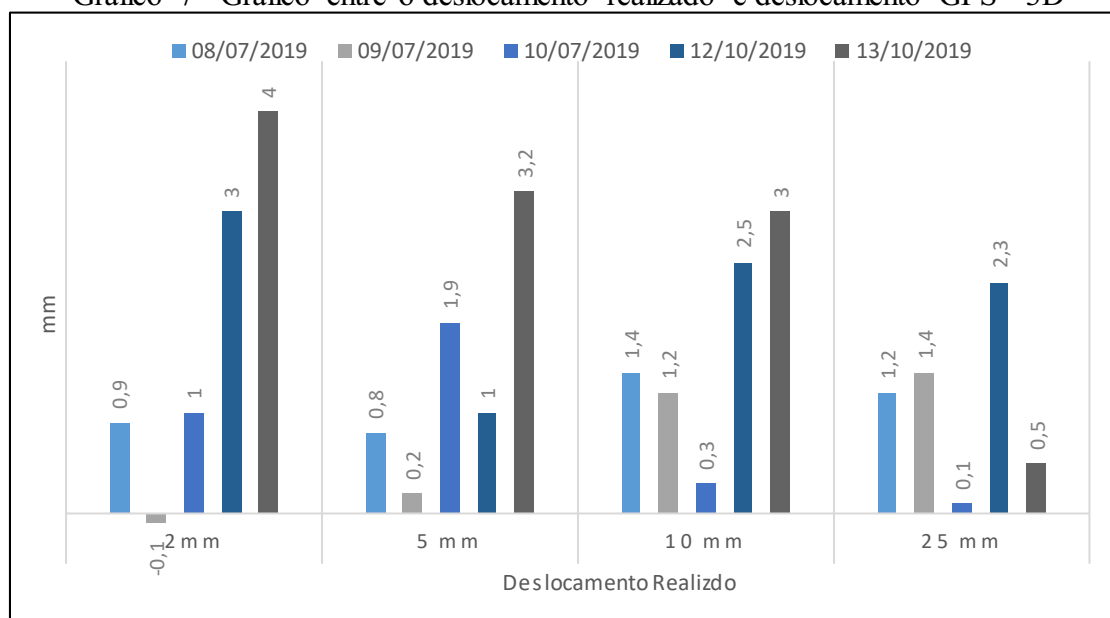


Fonte: O autor.

O Gráfico 7 apresenta a diferença entre o deslocamento, realizado em campo para o deslocamento calculado pelo receptor GPS, podemos observar que deslocação é sempre maior que a realizada em campo, apenas no ponto 2 mm para o dia 09 de julho ocorreu um

deslocamento menor que o realizado em campo. A ocorrência da maioria dos deslocamentos terem o mesmo sentido, pode ser causado pela presença de erro sistemático.

Gráfico 7 - Gráfico entre o deslocamento realizado e deslocamento GPS - 3D



Fonte: O autor.

6.3 Detecção de deslocamento tridimensional e bidimensional com maior redundância

A aplicação do teste de congruência global, com maior redundância deu-se, ajustando as observações das posições homologas para os dias diferentes, em cada dia para cada posição tivemos 9 observações, portanto unido dois dias obtivemos 18 observações para ajustar 3 parâmetros, isso no tridimensional. Deste modo obtivemos 15 graus de liberdade para cada posição. Já no bidimensional foi excluída a componente altimétrica deste modo tendo 6 observações para cada dia, no ajustamento dos dois dias foram um total de 12 observações para obter 3 parâmetros resultando em 9 graus de liberdade.

A Tabela 13 apresenta os deslocamentos encontrados empregando uma redundância maior na quantidade de observação. Analisando o valor do deslocamento de 2mm, na Tabela 13 tivemos um deslocamento de 2,2 mm, que foi possível detectar, com nível de significância de 0,2. A posição de 2 mm no bidimensional conseguiu-se detectar a um nível de significância de 0,05, no tridimensional não foi possível devido ao valor crítico na posição 2 mm ser menor que no bidimensional.

Tabela 13- TCG dias 09/07 e 10/07

Desl realizado	Fc	0,01	0,05	3D				
				0,2	0,32			
F, α ,h,r	-----	4,5794	2,9223	1,6445	1,2186	Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
2 mm	2,42	AC	AC	RE	RE	2,2	0,0015	0,0210
5 mm	9,60	RE	RE	RE	RE	5,9	0,0045	0,1337
10 mm	112,96	RE	RE	RE	RE	11,5	0,0015	0,5132
25 mm	379,38	RE	RE	RE	RE	26,7	0,0028	3,1513
Desl realizado	Fc	0,01	0,05	2D				
				0,2	0,32			
F, α ,h,r	-----	7,5594	4,1028	1,8986	1,2797	Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
2 mm	5,00	AC	RE	RE	RE	2,1	0,0021	0,0213
5 mm	15,52	RE	RE	RE	RE	5,7	0,0038	0,1315
10 mm	153,14	RE	RE	RE	RE	11,5	0,0016	0,4880
25 mm	621,37	RE	RE	RE	RE	26,6	0,0024	2,9200

Fonte: O autor.

Para o mês de outubro um novo ajustamento foi realizado, aumento o número de observações tanto no tridimensional quanto no bidimensional. Na Tabela 14 os deslocamentos GPS no tridimensional são maiores que os deslocamentos no bidimensional, ressaltando que a componente altimétrica influencia nos deslocamentos. Observando a Tabela 14 podemos verificar que a componente altimétrica influenciou nos valores obtidos pela variância entre as épocas, pois os valores no tridimensional são maiores que no bidimensional. Esses valores menores ressaltam que as observações do bidimensional tiverem resíduos baixos comparados ao tridimensional. A variância menor resulta em um valor crítico maior, deste modo o TCG acaba sendo rejeitado e detectando o deslocamento.

Tabela 14 - TCG 2D dias 12/10 e 13/10

Desl realizado	Fc	0,01	0,05	0,2	0,32	Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
F, α , h, r	-----	4,5794	2,9223	1,6445	1,2186			
2 mm	8,72	RE	RE	RE	RE	5,2	0,0028	0,0738
5 mm	10,20	RE	RE	RE	RE	6,2	0,0046	0,1281
10 mm	49,65	RE	RE	RE	RE	12,5	0,0039	0,5800
25 mm	218,93	RE	RE	RE	RE	27,3	0,0042	3,0050
Desl realizado	Fc	0,01	0,05	0,2	0,32	Desl GPS (mm)	σ_{0ij}^2 m ²	Ω
F, α , h, r	-----	7,5594	4,1028	1,8986	1,2797			
2 mm	14,48	RE	RE	RE	RE	3,5	0,0017	0,0489
5 mm	69,84	RE	RE	RE	RE	6,7	0,0013	0,1749
10 mm	538,57	RE	RE	RE	RE	12,3	0,0005	0,6034
25 mm	3163,40	RE	RE	RE	RE	25,5	0,0004	2,5400

Fonte: O autor.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelos aspectos observados, podemos concluir que o dispositivo de simulação teve movimentações horizontais e verticais, mas pelo teste de congruência global afirmou que ao nível de significância de 0,05 nos dias 9 e 10 de julho os pontos ficaram estáveis e no mês de outubro ao nível de significância de 0,01 os dias 12 e 13 de julho não tiveram movimentação. Sabemos também que ocorreu um erro do tipo 1, pois pela simples diferença de coordenadas obtivemos deslocamentos, mas para alguns pontos para o TCG afirmou que não ocorreu movimento significativo.

Podemos afirmar que um nível de significância de 0,2 consegue detectar mais deslocamentos (tridimensionais e bidimensionais) que os demais níveis propostos nesse trabalho. A melhora na detecção de deslocamentos no bidimensional reforça que a componente altimétrica deve ser excluída afim de obter melhores resultados. A influência de erros sistemáticos nas observações coletadas em campo, causam erro nas medidas fazendo com que a hipótese básica seja aceita quando ela deveria ser dada como rejeitada, isso deve-se pelo fato da qualidade das observações terem erros. A variância a posteriori fica maior o que influencia diretamente na variância entre as épocas e o valor de F calculado tende a ser menor que o $F_{\alpha,h,r}$ o que não rejeita a hipótese básica, informado que não houve deslocamento quando na verdade teve.

Sabendo que as observações advindas por meio de receptores GNSS possuem erros aleatórios e sistemáticos, o teste de congruência global com redundância mostrou que o TCG consegue detectar mais, quando o número de observações é maior. Quando retirado a componente altimétrica e aumentando a redundância de observações o TCG tende a detectar mais deslocamentos com nível de significância mais alto o que deixa o TCG mais rigoroso, pois buscamos a região de rejeição.

O melhor valor detectado foi de 2,1 mm no bidimensional com redundância então o emprego desse sistema é válido desde que se obtenha redundância nas observações a fim melhorar a qualidade das coordenadas e a variância entre as épocas, fazendo com que o valor crítico seja maior e assim detectar a movimentação entre as posições no nível de significância de 0,2 e 0,05. Mas o TCG leva em consideração o deslocamento então quando maior ele for mais chance o TCG tende a aceitar, deste modo recomenda-se a aplicação do teste para deslocamentos maiores de 10 mm

Para trabalhos futuros, seria interessante, realizar essa metodologia aumentando o número de sessões para o deslocamento de 2 mm e quantidade de dias para verificar a detecção

em um nível de significância maior que 0,2. Uma outra proposta seria realizar esse teste de congruência global com posicionamento relativo estático em tempo real.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO NETO, J.O. **Uso do GPS no monitoramento dinâmico da infraestrutura de transportes:** pontes rodoviárias em concreto. 2017. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil, na área de Transportes, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em :< http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/325532/1/AraujoNeto_JoaoOlympioDe_D.pdf>. Acesso em: 3 de junho. 2019.
- BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C. A evolução dos referenciais usados em Geodésia: a era moderna. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, 2002. v. 8, n. 1, p.3-16. Disponível em: < <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/viewFile/1410/1164>>. Acesso em: 3 de junho 2019.
- BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C.; GUIMARÃES, G. N.; COSTA, S. M. A.; O conceito atual dos referenciais usados em Geodesia. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2011. Disponível em:< <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43758/23022>> Acesso em: 3 de junho. 2019.
- BRASIL. Decreto nº 4.740, de 13 de junho de 2003. **R.PR – 1:** Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. 1. ed. Rio de Janeiro: Ibge, 2 de fevereiro de 2005.
- BUENO, R. F. **Monitoração, por GPS, de deslocamentos em estruturas com carga dinâmica.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/T.3.2007.tde-08012008-144719. Acesso em: 03 de junho. 2019.
- GEMAEL, C; MACHADO, A. M. L; WANDRESEN, R. **INTRODUÇÃO AO AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES: APLICAÇÕES GEODÉSICAS.** 2. ed. Curitiba: Ufpr, 2015. 430 p.
- CHAVES, J. C. **Uso da tecnologia GPS na monitoração de deformação: sistemas, etapas e experimentos.**2001. 114 f. Tese (Doutorado) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001
- DAL’FORNO, G. L.; AGUIRRE, A. J.; HILLEBRAND, F. L; GREGÓRIO, F. D. V. Transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas no plano topográfico local pelos métodos da norma NBR 14166: 1998 e o de rotações e translações. **Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife**, 2010. Disponível em: < <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/download/5420/3549>> Acesso em: 3 de junho 2019
- DEPARTMENT OF ARMY – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Manual 1110- 1-1004. **Deformation Monitoring and Control Surveying.** Washington, DC, 1994. Disponível em: <<https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA402107.xhtml>> Acesso em: 3 de junho 2019.

FAZAN, J. A. **Aplicação do teste de congruência global e análise geométrica para detecção de deslocamentos em redes geodésicas**: estudo de caso na UHE de Itaipu. 2010. 278 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Springer Science & Business Media, 2007.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Define a data de término do período de transição definido na RPR 01/2005 e dá outras providências sobre a transformação entre os referenciais geodésicos adotados no Brasil. Resolução da presidência**. 1ª edição, v. 1, 2015.

IBGE. Rede **Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html>> Acesso em: 04 de junho. 2019

IBGE: **Especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017

McCarthy D. D. and Petit G., IERS conventions (2003), **IERS Technical note 32**, 2004

LANGLEY, Richard B. Propagation of the GPS signals. In: **GPS for Geodesy**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996. p. 103-140.

LANGLEY, R. B.; TEUNISSEN, P, J, G.; MONTENBRUCK, O. Principles of GNSS: Introduction to GNSS. In: TEUNISSEN, P J, G.; MONTENBRUCK, O. **Handbook Springer of Global Navigation Satellite Systems**. New York: Springer, 2017. Cap. 1. p. 3-23.

MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS**. 2012. 244 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012

MONICO, J. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. Editora Unesp, 2007.

NADAL, C. A.; VEIGA, L. A. K.; SOARES, M. R.; FAGGION, P. L. **Monitoramento Geodésico da Barragem da UHE de Mauá Utilizando Métodos Geodésicos que Permitem a Precisão do Milímetro**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30., 2015, Foz do Iguaçu, PR: CBDB. 16 f

PEREIRA, K. D., OLIVEIRA, L.C., Integração das Redes de Monitoramento Contínuo: Uma necessidade? **XXI Congresso Brasileiro de Cartografia**, Belo Horizonte, MG, 2003

POLETO, L. J. **Estudo da Aplicação do GPS no monitoramento de deslocamento em estruturas**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

RODRIGUES, D. D. **Rede geodésica de precisão no Estado de Minas Gerais: avaliação de diferentes estratégias de processamento e ajustamento.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Cap. 2.

SIGUEL, A. R. **Monitoramento da Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá Utilizando Irradiação Tridimensional.** Curitiba: 2013. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications.** Walter de Gruyter, 2003.

SIRGAS. **Rede SIRGAS de Monitoramento Contínuo.** Disponível em: <
<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/>>. Acesso em 25 de abril de 2019

SIRGAS. **Sistema de Referência Geocêntrico.** Disponível em: <
<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-definition/>>. Acesso em 25 de abril de 2019

SILVA, E.F.; MIRANDA, C.D. M.; MONICO, J.F. G. O uso de receptores GPS no monitoramento planimétrico na UHE Luiz Eduardo Magalhães. In: XXX – SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais...**Foz do Iguaçu: Cbdb, 2015. p. 1 - 18

SUCI, F. M.; FAGGION, P. L. Análise da estabilidade da rede geodésica de monitoramento da UHE Salto Caxias a partir de dados gps. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 4, 2012.