

Universidade Federal do Paraná

BOLETIM DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS

(ON LINE) ISSN 1982-2170

Bol.Ciênc.Geod.	Curitiba	v. 21, nº 1	p. 3-232	2015
-----------------	----------	-----------------------------	--------------------------	----------------------

BOLETIM DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS

Vol. 21, n. 1

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

<http://www.ser.ufpr.br>

<http://www.ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg>

Referenciado: American Geological Institute - AGI

Indexado: DOAJ - Directory of Open Access Journals - <http://www.doaj.org>

SciSearch. - Science Citation Index Expanded.

SciELO - Scientific Electronic Library Online - www.scielo.br/bcg, www.scielo.org

ISI -Institute for Scientific Information –**Thompson Reuters**

O Boletim de Ciências Geodésicas é uma publicação da Universidade Federal do Paraná, e tem como propósito a divulgação dos mais recentes conhecimentos técnicos e científicos na área das Ciências Geodésicas e afins.

ISSN 1982-2170 (on line)

Editor – Chefe

Luciene Stamato Delazari -UFPR - luciene@ufpr.br

Secretária

Fabiane Oshikawa UFPR – fabiane.oshikawa@gmail.com

EDITORES ASSOCIADOS

Geodésia e Levantamentos

Daniele Barroca Marra Alves – UNESP – bcg.daniele@gmail.com

Claudia Tocho UNLP - ctocho@fcaglp.unlp.edu.ar

Vagner Gonçalves Ferreira - Universidade de Hohai - vagnergf@gmail.com

Fotogrametria e Sensoriamento Remoto

Antonio Maria Garcia Tommaselli -UNESP - tomaseli@fct.unesp.br

Edson Aparecido Mitishita - UFPR - mitishita@ufpr.br

Leila Maria Garcia Fonseca – INPE – leila@dpi.inpe.br

Ana Lúcia Bezerra Candeias – UFPE – analucia@ufpe.br

Cartografia e Sistemas de Informação Geográfica

Jorge Pimentel Cintra - EPUSP- jpcintra@usp.br

Luiz Felipe Coutinho Ferreira da Silva - IME - felipe@ime.eb.br

Marcio Augusto Reolon Schmidt – UFU - marcioschmidt@feciv.ufu.br

BOLETIM DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS

Centro Politécnico - Jardim das Américas C. P. 19001

81531-990 - Curitiba, Paraná, Brasil

Fone/fax: (0xx41) 3361-3637

<http://www.cienciasgeodesicas.ufpr.br>

e-mail: bcg.editora@ufpr.br

Coordenação de Processos Técnicos. Sistema de Bibliotecas. UFPR

Boletim de Ciências Geodésicas / Universidade Federal do Paraná. - n.1 (1996) - Curitiba - PR,1996-.

v. 21, n. 1, jan.- mar. 2015.

Trimestral.

Resumos em português e inglês.

Continuação de: Boletim da Universidade Federal do Paraná - Geodésia 1966-1988.

ISSN 1413-4853

ISSN 1982-2170 (on line)

1. Geodésia - Periódicos. I. Universidade Federal do Paraná.

CDD 526.1

APOIO:

- Sistema Eletrônico de Revistas – **SER** - <http://www.ser.ufpr.br>

- Programa de Apoio à Publicação de Periódicos – **PRPPG/UFPR** - www.prppg.ufpr.br

- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – **CNPq**

Revisão dos textos em inglês: Eva Cristina R. A. Dalmolin

Revisão dos artigos: Realizada pelos pares e referendada pelo Conselho Editorial.

É permitida a reprodução, com menção da fonte de artigos e fotos sem reserva de direitos autorais. **Os artigos são de inteira responsabilidade dos autores.**

ISSN 1982-2170 (on line)

SUMÁRIO

ARTIGOS

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO POSICIONAMENTO RELATIVO A PARTIR DO AUSPOS. *Statistical analysis of the relative positioning obtained from AUSPOS*. Alessandro Salles Carvalho; Jane Azevedo da Silva; William Rodrigo Dal Poz. 03

COMO ESTIMAR O PODER DO TESTE MÍNIMO E VALORES LÍMITES PARA O INTERVALO DE CONFIANÇA DO DATA SNOOPING. *How to estimate the minimum power of the test and bound values for the confidence interval of Data Snooping procedure*. Ivandro Klein; Marcelo Tomio Matsuoka; Matheus Pereira Guzzato. 26

CORRECCIONES DIFERENCIALES VÍA NTRIP PARA DISPOSITIVO MÓVIL CON APLICACIÓN ANDROID. *Differential corrections by NTRIP to mobile devices with android application*. Alfonso Tierra; Oscar Silva; César Leiva. 43

O PROBLEMA DA QUALIDADE DE DADOS ESPACIAIS NA ERA DAS INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS VOLUNTÁRIAS. *The Geospatial Data Quality subject in the Volunteered Geographic Information era*. João Vitor Meza Bravo; Claudia Robbi Sluter. 56

INFLUÊNCIA DO GÊNERO NA DEMANDA VISUAL POR MAPAS EM ESCALAS DIFERENTES EM SISTEMA DE NAVEGAÇÃO E GUIA DE ROTA. *The gender effect on visual demand for maps at different scales in route guidance and navigation system*. Ana Paula Marques Ramos; Mônica Modesta Santos Decanini; Edmur Azevedo Pugliesi; Vilma Mayumi Tachibana. 74

PROPOSTA DE INTERSECÇÃO DE LINHAS GEODÉSICAS SOBRE A SUPERFÍCIE ESFÉRICA E SOBRE O ELIPSÓIDE DE REVOLUÇÃO. *Motion for intersection geodesic lines on spherical surface and on the revolution ellipsoid*. Marcos Aurélio Basso; Luiz Fernando Macedo Morescki Junior; Alyne Raminelli Siguel; Carlos Aurélio Nadal. 92

LAND CAPABILITY EVALUATION FOR ECOTOURISM DEVELOPMENT IN ILAM PROVINCE, A GIS APPROACH. *Avaliação da capacidade da terra para desenvolvimento de ecoturismo na província de Ilam. Uma abordagem com utilização de SIG.* Mehdi Ahmadi; Shamsollah Asgari; Ezatollah Ghanavati. 107

MODELAGEM DO ERRO SISTEMÁTICO DE DISTÂNCIA NAS MEDIÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA PMD CAMCUBE 3.0. *Systematic depth error modeling in range measurements on PMD CamCube 3.* Felipe Martins Marques da Silva; Jorge Antonio Silva Centeno. 126

ORIENTAÇÃO E ORTORRETIFICAÇÃO DE IMAGENS TERRESTRES NADIRAIS. *Orientation and orthorectification of nadiral terrestrial images.* Adilson Berveglieri; Marcus Vinícius Antunes de Moraes; Antonio Maria Garcia Tommaselli. 149

A MODEL SUGGESTION FOR THE DETERMINATION OF THE TRAFFIC ACCIDENT HOTSPOTS ON THE TURKISH HIGHWAY ROAD NETWORK: A PILOT STUDY. *Sugestão de modelo para a determinação de pontos críticos de acidentes de tráfego na rede de estradas de rodagem da Turquia: um estudo piloto.* Saffet Erdogan; Veli İlçi; Omer M. Soysal; Aysegul Korkmaz. 169

DETERMINISTICALLY-MODIFIED INTEGRAL ESTIMATORS OF GRAVITATIONAL TENSOR. *Estimadores integrais determinísticos modificados do tensor gravitacional.* Mohsen Romeshkani; Mehdi Eshagh.. 189

SHORT STATIC GPS/GLONASS OBSERVATION PROCESSING IN THE CONTEXT OF ANTENNA PHASE CENTER VARIATION PROBLEM. *Elaboração de curtas sessões estáticas de observação de GPS/GLONASS no contexto do problema de variação da posição de centro de fase da antena.* Karol Dawidowicz; Rafal Kazmierczak; Krzysztof Swiatek. 213

ARTIGOS

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO POSICIONAMENTO RELATIVO A PARTIR DO AUSPOS

Statistical analysis of the relative positioning obtained from AUSPOS

ALESSANDRO SALLES CARVALHO^{1,3}
JANE AZEVEDO DA SILVA²
WILLIAM RODRIGO DAL POZ³

^{1,2}Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF
Juiz de Fora - Minas Gerais - Brasil

³Universidade Federal Viçosa – UFV
Viçosa – Minas Gerais - Brasil

{alessandro.carvalho@ufjf.edu.br; janeas@engenharia.ufjf.br;
william.dalpoz@ufv.br}

RESUMO

A disponibilidade de sistemas de processamento de dados GPS (*Global Positioning System*), online e gratuitos, tem aumentado nos últimos anos. Dentre esses destaca-se o AUSPOS (v.2.1) o qual emprega o programa BERNESE (v. 5.0) para realização do posicionamento relativo estático. O objetivo desse trabalho é verificar a qualidade do posicionamento planimétrico e altimétrico obtido com o uso do AUSPOS. Para isso foram utilizados arquivos contendo sessões de observações GPS de 4, 6 e 24 horas, no período de 22 dias consecutivos, no mês de setembro de 2013, das estações CRUZ, IMBT, IMPZ, MGIN e POAL, pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS). Os resultados mostraram menor variabilidade posicional com o aumento da duração da sessão de rastreamento e as acurácias planimétrica e altimétrica sub-centimétricas para o período de 24h e centimétricas para os períodos de 4h e 6h.

Palavras-chave: AUSPOS; Posicionamento Relativo GPS online; Acurácia.

ABSTRACT

The availability of processing systems of GPS data, online and free, has increased in the last years. Among these, the AUSPOS (v.2.1) system, which employs the Bernese software (v.5.0) to realize of the static relative positioning, stands out. This

paper aims at checking the quality of planimetric and altimetric positioning obtained using the AUSPOS system. Files containing GPS observations of 4, 6 and 24 hour sessions were used in the period of 22 consecutive days in September 2013 of the CRUZ, IMBT, IMPZ, MGIN and POAL, stations belonging to RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS systems). The results have shown lower positional variability with increase of the tracking session duration, and the planimetric and altimetric accuracies has reached subcentimeter level for 24 hours and centimetric level for 4 and 6 hours.

Keywords: AUSPOS; GPS Relative Positioning; Accuracy.

1. INTRODUÇÃO

Vários serviços online de processamento de dados GPS (*Global Positioning System*) têm sido desenvolvidos e disponibilizados gratuitamente por diferentes organizações (GHODDOUSI-FARD e DARE, 2006; OCALAN, ERGAN e TUNALIOGLU, 2013). Dentre esses serviços há os que permitem a realização do posicionamento relativo e Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). As ferramentas gratuitas mais utilizadas que permitem realizar o PPP são: CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning*), o IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Posicionamento por Ponto Preciso), o GAPS (*GPS Analysis and Positioning Software*) e o APPS (*Automatic Precise Positioning Service*); já as que permitem a realização do posicionamento relativo são: AUSPOS (*Online GPS Processing Service*), o OPUS (*Online Positioning User Service*) e o SCOUT (*Scripps Coordinate Update Tool*) (DAWSON, GOVIND e MANNING, 2001; GHODDOUSI-FARD e DARE, 2006; ADIYANTO e ROBERTS, 2007; TSAKIRI, 2008; EL-MOWAFY, 2011; OCALAN, ERDGAN e TUNALIOGLU, 2013; GOMEZ, COGLIANO e TELLO, 2013; IBGE, 2014). Os requisitos básicos para que usuários utilizem esses diferentes serviços são praticamente os mesmos: acesso à Internet e um endereço de e-mail válido (GHODDOUSI-FARD e DARE, 2006). Para a realização dos experimentos deste trabalho foi utilizado o serviço de processamento de dados GPS - AUSPOS.

O método de posicionamento relativo estático é frequentemente utilizado na implantação de redes geodésicas, no transporte de coordenadas e na determinação de pontos temáticos. Como resultado do pós-processamento dos dados GPS são obtidos vetores linha de base os quais ligam as estações de coordenadas conhecidas àquelas a serem determinadas. Para a realização do pós-processamento o AUSPOS utiliza efemérides precisas do IGS (*International GNSS Service*), as quais estão vinculadas desde 07 de outubro de 2012, semana GPS 1709, até o presente, ao sistema de referência Igb08 (REBISCHUNG, 2012; REBISCHUNG et al., 2012). Atualmente, todas as coordenadas determinadas pelo AUSPOS estão no GDA94 (*Geocentric Datum of Australia 1994*) e no ITRF2008, época da coleta dos dados.

Devido a adoção de diferentes realizações de sistemas de referência para determinação das velocidades e coordenadas das estações, e as mesmas estarem

vinculadas a uma época específica, torna-se fundamental a compatibilização entre referenciais e épocas.

O objetivo deste trabalho é analisar a qualidade do posicionamento planimétrico e altimétrico obtido com uso do AUSPOS (v. 2.1) utilizando para isso, dados coletados por estações pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS).

2. SISTEMAS DE REFERÊNCIA E REALIZAÇÕES

O ITRS (*International Terrestrial Reference System* – Sistema de Referência Terrestre Internacional) é um sistema de referência tridimensional que gira com a Terra em seu movimento diurno no espaço. Nesse sistema, os pontos fixos à crosta da Terra sofrem pequenas variações com o tempo devido aos efeitos geofísicos (PETIT e LUZUM, 2010).

O ITRS é realizado e mantido pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) (ALTAMIMI, COLLILIEUX e MÉTIVIER, 2012). A realização mais atual é denominada de ITRF2008 e foi construída com base em observações obtidas por técnicas geodésicas espaciais: VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) e GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (ITRF, 2014). O ITRF2008 é composto por 934 estações distribuídas em 580 localidades, na qual 463 estão localizadas no hemisfério norte e 117 no hemisfério sul (ALTAMIMI, COLLILIEUX e MÉTIVIER, 2012).

A realização do ITRS pelo IGS é denominada de IGB08 e foi obtida com o emprego de observações GNSS. As efemérides precisas disponibilizadas pelo IGS estão, atualmente, vinculadas ao referencial IGB08 o qual é alinhado ao ITRF2008 (IGS, 2014).

O Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) é realizado por meio de uma rede de estações GNSS de funcionamento contínuo denominada de SIRGAS-CON. As coordenadas semanais das estações são dadas no referencial IGB08, época média do período da coleta dos dados. Há também a solução multianual (SIR11P01) da rede SIRGAS-CON, na qual são fornecidas as coordenadas no ITRF2008, época 2005,0 e velocidades cartesianas geocêntricas no ITRF2005 das estações (SIRGAS, 2014).

2.1 Relacionamento entre Sistemas de Referência

2.1.1 Mudança de Referencial das Coordenadas das Estações e das Velocidades

A transformação de similaridade é utilizada para relacionar dois sistemas de referência por meio de três translações, três rotações e um fator de escala (PETIT E LUZUM, 2010). Na atualização dos sete parâmetros de transformação e na mudança do referencial das velocidades dos pontos de interesse é necessário considerar suas variações temporais (ITRF, 2014).

De acordo com Petit e Luzum (2010), Altamimi, Collilieux e Métivier (2012) e ITRF (2014), o modelo matemático utilizado para transformação das coordenadas do sistema referência de origem (o) para o sistema de referência destino (d) pode ser expresso por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_Z & R_Y \\ R_Z & D & -R_X \\ -R_Y & R_X & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_o, \quad (1)$$

em que:

$[X \ Y \ Z]_d^T$: vetor das coordenadas cartesianas geocêntricas no sistema de referência destino, dadas em metros;

$[X \ Y \ Z]_o^T$: vetor das coordenadas cartesianas geocêntricas no sistema de referência origem, dadas em metros;

$[T_X \ T_Y \ T_Z]^T$: vetor das translações da origem do sistema de origem no sistema de referência destino, dadas em metros;

R_X, R_Y, R_Z : rotações diferenciais em torno dos eixos X, Y, Z respectivamente para estabelecer o paralelismo da rede origem com a rede destino, dadas em radianos;

D: fator diferença de escala, adimensional.

É importante salientar que os sete parâmetros de transformação e as coordenadas dos pontos nos dois sistemas devem estar na mesma época.

De acordo com Altamimi, Collilieux e Métivier (2012) o modelo matemático para realizar a mudança de referencial das velocidades das estações pode ser expresso por:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_o + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{R}_Z & \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z & \dot{D} & -\dot{R}_X \\ -\dot{R}_Y & \dot{R}_X & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_o, \quad (2)$$

em que:

$[V_X, V_Y, V_Z]_d^T$: vetor das velocidades cartesianas no sistema destino;

$[V_X, V_Y, V_Z]_o^T$: vetor das velocidades cartesianas no sistema origem;

$[\dot{T}_X \ \dot{T}_Y \ \dot{T}_Z]^T$: vetor das variações temporais das translações;

$\dot{R}_X, \dot{R}_Y, \dot{R}_Z$: variações temporais das rotações diferenciais em torno dos eixos X, Y, Z;

\dot{D} : variação temporal do fator de escala.

Na mudança de referencial das velocidades do ITRF2008 para ITRF2005, apenas a velocidade na componente X é alterada, pois com exceção da variação temporal da translação em torno do eixo X, as demais são iguais a zero.

Os parâmetros de transformação entre realizações do ITRS podem ser obtidos no site http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt, os quais

permitem o relacionamento do ITRF2008 para realizações anteriores. Deste modo, para transformações como, por exemplo, do ITRF2005 para ITRF2008, basta trocar o sinal do parâmetro. Para atualizar os parâmetros da época 2000,0 para outra época de interesse, pode-se utilizar o modelo matemático expresso por (ITRF, 2014):

$$\begin{bmatrix} T_X(t) \\ T_Y(t) \\ T_Z(t) \\ D(t) \\ R_X(t) \\ R_Y(t) \\ R_Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_X(t_0) \\ T_Y(t_0) \\ T_Z(t_0) \\ D(t_0) \\ R_X(t_0) \\ R_Y(t_0) \\ R_Z(t_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix} (t-t_0), \quad (3)$$

em que:

t : época de interesse dos parâmetros, dados em anos e sua fração;

t_0 : época de origem dos parâmetros, dados em anos e sua fração.

2.1.2 Atualização de Coordenadas

A atualização de coordenadas de uma época origem para uma época de interesse pode ser realizada com o emprego das equações SIRGAS (2014):

$$X(t) = X(t_0) + V_X(t-t_0); \quad (4)$$

$$Y(t) = Y(t_0) + V_Y(t-t_0); \quad (5)$$

$$Z(t) = Z(t_0) + V_Z(t-t_0), \quad (6)$$

em que:

t : época de interesse para a determinação das coordenadas cartesianas, dada em ano e sua fração;

t_0 : época de origem das coordenadas cartesianas, dada em ano e sua fração;

$X(t), Y(t), Z(t)$: coordenadas cartesianas geocêntricas de uma estação na época de destino;

$X(t_0), Y(t_0), Z(t_0)$: coordenadas cartesianas geocêntricas de uma estação na época de origem.

Este procedimento permite que seja considerado o deslocamento da estação no intervalo de tempo, dado entre a época de determinação da coordenada e a época de interesse, devido ao movimento da placa litosférica.

3. SERVIÇO ONLINE DE PROCESSAMENTO DE DADOS GPS - AUSPOS

AUSPOS é um serviço de pós-processamento de dados GPS, gratuito, fornecido pela agência australiana de geociências que pode ser acessado em <<http://www.ga.gov.au/earth-monitoring/geodesy/auspos-online-gps-processing-service.html>>. A versão 2.1 do AUSPOS foi lançada em primeiro de outubro de 2013.

A determinação posicional no ITRF em qualquer parte da Terra pelo AUSPOS é feita utilizando produtos IGS tais como: efemérides precisas, parâmetros de orientação da Terra, coordenadas e observáveis GPS das estações ativas da rede IGS (GEOSCIENCE AUSTRALIA, 2014).

O pós-processamento dos dados GPS é feito utilizando o método relativo estático com o emprego do software Bernese GNSS, desenvolvido pela AIUB (*Astronomical Institute of the University of Bern*). Informações sobre esse software podem ser obtidas em (<http://www.bernese.unibe.ch/>).

Atualmente, para determinação das coordenadas no referencial ITRF2008, época média dos dados coletados, deve-se enviar, via *upload* ou *ftp* (*File Transfer Protocol*), as observáveis, no formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange*), coletadas no modo estático, por receptores geodésicos de dupla frequência. Quando o arquivo de observações RINEX é submetido, 15 estações ativas da rede IGS e APREF (*Asia-Pacific Reference Frame*) mais próximas ao ponto a ser determinado poderão ser utilizadas como estações de referência para o posicionamento relativo e ajustamento (GEOSCIENCE AUSTRALIA, 2014).

Nos processamentos, os efeitos das fontes de erros, tais como: erro do relógio dos receptores, troposfera e ionosfera são levados em consideração por meio da modelagem ou estimação dos parâmetros relacionados. Todos os cálculos são efetuados de acordo com as convenções do IERS <http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/Conventions/conventions.html?__nnn=true>. Salienta-se que a correção do efeito devido a carga oceânica não é levada em consideração nos processamentos.

Para a realização do processamento o usuário deverá submeter ao serviço apenas os dados de observação GPS, o tipo e altura da antena utilizada e um e-mail válido para o recebimento do relatório de processamento. Embora as observações da RBMC sejam armazenadas com intervalo de 15 segundos, são empregados intervalos de 30 segundos para o processamento.

OAUSPOS utiliza a nomenclatura de antena adotada pelo IGS e parâmetros de calibração NGS (*National Geodetic Survey*). Podem ser submetidos arquivos de observação de até 20 estações. No relatório estão presentes as coordenadas no GDA94 e no ITRF2008.

4 METODOLOGIA

4.1 Obtenção dos dados

Os dados GPS das estações da RBMC utilizados compreendem o período de 08/09/2013 a 29/09/2013 e correspondem aos dias do ano de 251 a 272, perfazendo um total de 22 dias consecutivos. Foram escolhidas cinco estações da RBMC que contribuíram para solução multianual da rede SIRGAS-CON. As estações utilizadas são denominadas de: CRUZ (Cruzeiro do Sul / AC); IMBT (Imbituba / SC); IMPZ (Imperatriz / MA); MGIN (Inconfidentes / MG) e POAL (Porto Alegre / RS). As observações GPS dessas estações, no formato RINEX, foram adquiridas no site do

IBGE mantenedor do projeto RBMC. Os períodos de observações utilizadas são da 0h à 4h, das 0h às 06h e das 0h às 24h.

4.2 Determinação das Coordenadas pelo AUSPOS

No processamento dos dados GPS, o AUSPOS utilizou 15 estações de controle pertencentes à rede IGS e efemérides precisas finais. No ajustamento, as coordenadas das estações IGS foram injuncionadas com incertezas de 0,001m para as componentes horizontais e de 0,002m para vertical. Todas as coordenadas foram determinadas em ITRF2008, época 2013,7.

No Quadro 1 encontram-se os principais modelos e estratégias utilizadas para o processamento das linhas de base pelo software Bernese no serviço AUSPOS.

Quadro 1 - Estratégias e modelos utilizadas no processamento pelo AUSPOS versão 2.1.

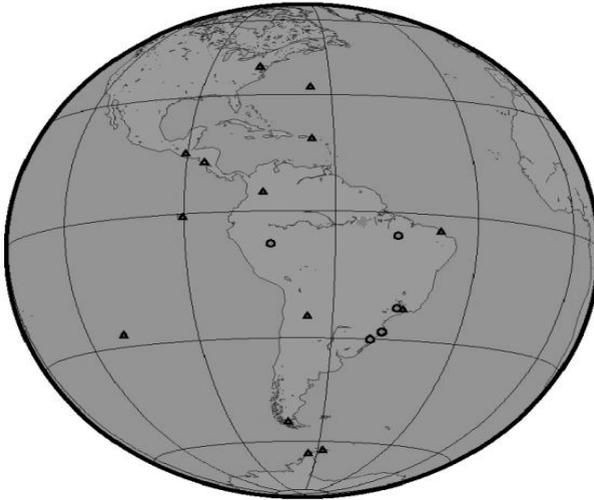
Software	Bernese GPS Software V. 5.0.
Sistema GNSS	GPS
Observações	Dupla Diferença de Fase
Taxa de coleta utilizada	30 s
Máscara de elevação	10°
Estratégia de Linha de Base	Pré-processamento de linha de base por linha de base com o uso da Tripla Diferença de Fase.
Efemérides precisas/EOP	O melhor produto IGS disponível. (Foi utilizada órbita IGS final).
Modelo de Troposfera	Modelo a priori: Saastamoinen baseado no mapeamento hidrostático com Niell (componente seca).
Função de Mapeamento Troposférico	Niell
Troposfera local	As correções do atraso zenital são estimadas para cada estação a cada duas horas com o emprego da função de mapeamento de Niell (componente úmida).
Ionosfera	Efeito de primeira ordem eliminado pela utilização da combinação linear L1 e L2.
Ambiguidades	Resolvidas linha de base por linha de base com uso da estratégia <i>Quasi-Ionosphere-Free</i> (QIF)
Modelo de Marés Terrestres	IERS Conventions 2003
Modelo de Carga Oceânica	Não aplicado
Modelo de Carga Atmosférica	Não aplicado
Modelo de Correções do Centro de Fase (Absoluto)	IGS08

A Figura 1 ilustra a distribuição espacial aproximada das estações IGS e da RBMC utilizadas no processamento. Os triângulos representam as estações de

referência da rede do IGS e os círculos representam as estações da RBMC utilizadas para essa pesquisa.

Figura 1 - Distribuição espacial aproximada das estações utilizadas nos processamentos.

Fonte: Adaptado de (GEOSCIENCE AUSTRALIA, 2014).



Estações de referência do IGS utilizadas: BOGT, BRFT, BRMU, CHPI, CRO1, GLPS, GODE, GUAT, ISPA, MANA, OHI2, PALM, PARC, UNSA e USNO.

4.3 Determinação das Coordenadas de Referência

Para verificar a acurácia do posicionamento proporcionado pelo AUSPOS, as coordenadas obtidas para cada estação foram comparadas com suas posições, provenientes da solução multianual (SIR11P01) da rede SIRGAS-CON, e tomadas como referência. As coordenadas das estações dessa solução são vinculadas ao ITRF2008, época 2005,0. A partir das velocidades das estações no ITRF2008 foi possível atualizar suas coordenadas para a época média do período dos dados coletados (2013,7). Foi adotada a época média dos dados coletados para fins de comparação das coordenadas, pois em 11 dias, os deslocamentos das estações, devido ao movimento da placa litosférica, foram menores que 0,001 m.

No Quadro 2 encontram-se as velocidades cartesianas geocêntricas das estações obtidas da solução SIR11P01, as quais podem ser encontradas no site (<http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/SIR11P01.VEL>).

Quadro 2 – velocidades cartesianas geocêntricas no ITRF2005.

Estações	V _x (m/ano)	V _y (m/ano)	V _z (m/ano)
CRUZ	-0,0013	-0,003	0,0109
IMBT	0,0006	-0,0068	0,0105
IMPZ	-0,0022	-0,0035	0,0123
MGIN	0,0019	-0,0077	0,0099
POAL	0,0033	-0,0073	0,0097

Como as velocidades das estações são dadas no ITRF2005 e as coordenadas de origem estão no ITRF2008, foi necessário realizar a mudança de referencial das velocidades do ITRF2005 pra ITRF2008. Para isso, mudou-se o referencial das coordenadas das estações no ITRF2008 (2005,0) para ITRF2005 (2005,0) a partir das equações (1) e (3) com o uso dos parâmetros de transformação disponíveis no site do ITRF. Para mudança do referencial das velocidades do ITRF2005 para ITRF2008 foi utilizado o modelo matemático (2). A partir da compatibilidade dos referenciais das velocidades e das coordenadas foi possível por meio das equações (4), (5) e (6) atualizar as coordenadas ITRF2008, da época 2005,0 para a época média 2013,7.

As análises foram efetuadas utilizando as coordenadas planas no sistema Universal Transversa de Mercator (UTM) e as altitudes geométricas (elipsoide GRS80). Para isso, todas as coordenadas cartesianas geocêntricas em ITRF2008 (2013,7) foram convertidas para coordenadas planas UTM com o uso do aplicativo ProGrid, o qual pode ser obtido no site: ftp://geoftp.ibge.gov.br/aplicativos/transformacao_coordenadas/progrid.zip

Na Tabela 1 encontram-se as coordenadas de referência, no sistema UTM, das estações utilizadas neste trabalho.

Tabela 1 – Coordenadas UTM, ITRF2008 (2013,7), das estações.

Estações	Coordenadas (m)			Fuso (Sul)
	E	N	h	
CRUZ	756837,384	9157997,135	236,028	18
IMBT	730029,424	6874555,892	31,371	22
IMPZ	223300,673	9392399,007	104,991	23
MGIN	363219,689	7531310,119	883,698	23
POAL	488457,521	6673004,218	76,7455	22

4.4 Análises Estatísticas

Para a construção do Intervalo de Confiança (IC) para a média populacional μ , desconhecendo a variância populacional σ^2 e para $n < 30$, a variável z da distribuição normalé substituída pela variável t da distribuição de t Student. Para sua aplicação, foi necessário verificar o pressuposto de normalidadeda população com o

uso do teste não paramétrico de Shapiro-Wilk, pois o tamanho da amostra é menor que 50. As hipóteses foram enunciadas da seguinte forma:

H_0 : a amostra provém de uma população normal.

H_a : a amostra provém de uma população não normal.

Foi utilizado nível de significância $\alpha = 5\%$ e a decisão do teste foi tomada com base na probabilidade de significância (p-valor). Esse pode ser interpretado como o grau de concordância entre os dados e a hipótese nula. Deste modo, quanto menor for o p-valor, menor será a consistência entre os dados e a hipótese nula (MONTGOMERY e RUNGER, 2009). Conhecendo-se o p-valor pode-se testar a hipótese, sem impor, formalmente, um nível pré-selecionado de significância.

A decisão do teste de hipótese é tomada comparando-se o p-valor com o nível de significância α fixado.

Se p-valor $\leq \alpha \rightarrow$ rejeita-se H_0

Se p-valor $> \alpha \rightarrow$ não se rejeita H_0

Como foi selecionado $\alpha = 5\%$ se o p-valor for menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula.

A partir das coordenadas de referência e as obtidas via AUSPOS foram verificadas as acurácias, dado pelo Erro Quadrático Médio das componentes E (EQM_E) e N (EQM_N); o Erro Planimétrico (EP), e as acurácias planimétrica e altimétrica (EQM_p e EQM_h)

A acurácia das componentes planimétricas (E, N) é expressa matematicamente por (FGDC, 1998):

$$EQM_E = \sqrt{\sum \frac{(E_{AUSPOS,i} - E_{Ref,i})^2}{n}}; \quad (7)$$

$$EQM_N = \sqrt{\sum \frac{(N_{AUSPOS,i} - N_{Ref,i})^2}{n}}; \quad (8)$$

em que:

$E_{AUSPOS,i}$, $N_{AUSPOS,i}$: são as coordenadas da estação obtidas pelo AUSPOS;

$E_{Ref,i}$, $N_{Ref,i}$: são as coordenadas de referência da estação;

n: número de coordenadas;

i: é um inteiro que varia de 1 a n.

O Erro Planimétrico (EP) para uma estação i é definido como (FGDC, 1998):

$$EP = \sqrt{(E_{AUSPOS,i} - E_{Ref,i})^2 + (N_{AUSPOS,i} - N_{Ref,i})^2}. \quad (9)$$

A acurácia planimétrica (EQM_p) é dada por (FGDC, 1998):

$$EQM_P = \sqrt{\frac{[\sum((E_{AUSPOS,i} - E_{Ref,i})^2 + (N_{AUSPOS,i} - N_{Ref,i})^2)]}{n}} \quad (10)$$

ou

$$EQM_P = \sqrt{REQM_E^2 + REQM_N^2}. \quad (11)$$

O Erro Altimétrico (EA) no ponto *i* dado por:

$$\Delta h_i = h_{AUSPOS,i} - h_{Ref,i}. \quad (12)$$

A acurácia altimétrica é dada por (FGDC, 1998):

$$EQM_h = \sqrt{\frac{\sum (h_{AUSPOS,i} - h_{Ref,i})^2}{n}}, \quad (13)$$

em que:

$h_{AUSPOS,i}$, $h_{AUSPOS,i}$: é a altitude geométrica da estação obtida pelo AUSPOS;

$h_{Ref,i}$, $h_{Ref,i}$: é a altitude geométrica de referência da estação.

A média e variância amostral para cada componente posicional pode ser calculada por (MONTGOMERY E RUNGER, 2009):

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad (14)$$

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2, \quad (15)$$

em que:

n: número de dias de coleta de dados;

X_i : componentes (E, N, h) para cada dia, obtidas pelo AUSPOS, na época média adotada;

\bar{X}_i : média para cada componente (E, N, h);

S_X^2 : variância das componentes (E, N, h).

Outra forma de avaliar a acurácia proposta por Gauss, denominada EQM (Erro Quadrático Médio), a qual permite quantificar os valores de tendência e precisão, pode ser representada matematicamente pela expressão (MONICO *et al.*, 2009); MIKHAIL e ACKERMANN, 1976):

$$EQM(X) = m^2 = S_X^2 + (b)^2 \cong \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i^2}{n} \quad (16)$$

em que:

b: viés (tendência) (média das discrepâncias entre as coordenadas obtidas diariamente pelo AUSPOS em relação às de referência);

S_X^2 : variância amostral das discrepâncias;

De acordo com Monico et al. (2009), a expressão (16) para grandes amostras é praticamente igual à média quadrática dos erros ε_i .

As discrepâncias obtidas a partir da diferença entre os valores estimados com o uso do AUSPOS e os de referências são dadas por:

$$\Delta E_i = E_i - E_R; \quad (17)$$

$$\Delta N_i = N_i - N_R; \quad (18)$$

$$\Delta h_i = h_i - h_R, \quad (19)$$

em que:

E_i, N_i, h_i : componente posicional de cada estação obtida pelo AUSPOS para cada dia;

E_R, N_R, h_R : coordenadas de referência para cada estação.

$\Delta E_i, \Delta N_i, \Delta h_i$: discrepâncias das componentes (E, N, h).

O valor da tendência para cada componente de uma estação foi calculado a partir da média das discrepâncias ($\Delta E_i, \Delta N_i, \Delta h_i$) obtidas em 22 dias. Sua precisão foi obtida a partir do desvio padrão da média das discrepâncias.

Para verificar se a tendência é significativa ou não foi construído um Intervalo de Confiança (IC) de 95% para a média populacional μ , no qual foi verificado se o intervalo construído continha a coordenada de referência.

A expressão matemática utilizada para o IC para a média populacional μ_X de uma população normalmente distribuída pode ser dada por (MONTGOMERY E RUNGER, 2009):

$$P\left(\bar{X} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \times \frac{S_X}{\sqrt{n}} \leq \mu_X \leq \bar{X} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \times \frac{S_X}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha, \quad (20)$$

em que:

\bar{X} : média das componentes (E, N, h) para cada estação analisada;

μ_X : média populacional para cada componente;

n: número de dias de coleta de dados;

$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$: valor teórico da estatística t para α com (n-1) graus de liberdade.

Se o valor de referência estiver inserido nesse intervalo, considera-se que não houve tendência ao nível de probabilidade $1 - \alpha$, ou seja, o IC contém a verdadeira média com 95% de confiança (MONICO et al., 2009, MONTGOMERY E RUNGER, 2009).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a determinação das estatísticas e realização dos testes de hipóteses foi empregado o software livre R v. 3.1.0.

A Tabela 2 contém as porcentagens médias das ambiguidades resolvidas (% MAR) e os comprimentos médios das linhas de base (CMLB) envolvidos na determinação posicional das estações CRUZ, IMBT, IMPZ, MGIN e POAL para cada dia utilizado neste trabalho.

Tabela 2 – Ambiguidades (% MAR) e comprimentos das linhas de base(CMLB).

Dias	4 h		6 h		24 h	
	% MAR	CMLB (Km)	% MAR	CMLB (Km)	% MAR	CMLB (Km)
08/09/2013	52,5	1784,5	66,0	1821,4	79,6	1757,3
09/09/2013	54,5	1784,5	66,5	1833,6	81,1	1789,7
10/09/2013	43,0	1821,4	55,9	1833,6	80,9	1789,7
11/09/2013	58,7	1784,5	66,8	1833,6	81,7	1790,1
12/09/2013	38,4	1784,5	53,6	1818,7	80,7	1790,1
13/09/2013	54,7	1727,1	63,4	1804,4	83,1	1790,1
14/09/2013	37,2	1792,2	47,3	1751,7	79,0	1790,1
15/09/2014	39,0	1784,8	55,4	1696,6	81,0	1790,1
16/09/2013	38,5	1804,4	50,0	1801,8	79,7	1807,2
17/09/2013	42,7	1726,9	48,8	1704,4	77,7	1789,7
18/09/2013	49,8	1751,7	61,0	1818,7	80,6	1790,1
19/09/2013	59,1	1751,7	66,2	1818,7	82,1	1802,9
20/09/2013	44,3	1751,7	59,5	1794,3	78,7	1653,3
21/09/2013	30,0	1673,2	45,8	1764,0	75,8	1802,9
22/09/2013	37,0	1744,3	53,3	1764,4	75,4	1802,9
23/09/2013	21,7	1744,3	35,3	1758,5	72,6	1807,2
24/09/2013	53,1	1751,7	61,6	1769,2	80,1	1802,9
25/09/2013	39,4	1751,7	55,7	1769,2	77,8	1802,9
26/09/2013	23,6	1768,5	35,0	1765,4	73,2	1802,9
27/09/2013	30,4	1751,7	49,3	1765,0	74,8	1839,0
28/09/2013	27,8	1742,8	41,1	1847,8	73,5	1640,5
29/09/2013	24,5	1751,7	45,3	1848,2	74,3	1722,3

Verifica-se na Tabela 2 que a % MAR para duração da sessão de observação de 4 h tem valor máximo de 59,1, mínimo 21,7 e médio de 40,9. Para o CMLB foram encontrados valor máximo de 1.821,4 Km, mínimo de 1.673,2 Km e médio de 1.760,4 Km. A % MAR para duração da sessão de observação de 6 h tem valor máximo de 66,8, mínimo 35,0 e médio de 53,8. Para o CMLB foram encontrados valor máximo de 1.848,2 Km, mínimo de 1.696,6 Km e médio de 1.790,4 Km. A % MAR para duração da sessão de observação de 24 h valor máximo de 83,1, mínimo 72,6 e médio de 78,3. Para o CMLB foram encontrados valor máximo de 1.839,0 Km, mínimo de 1.640,5 Km e médio de 1.779,7 Km.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, verifica-se que o aumento da duração da sessão de observação implica na ampliação da porcentagem média de

resolução das ambiguidades das linhas de base. Assim, espera-se resultados mais confiáveis na determinação posicional das estações.

A Tabela 3 contém as coordenadas planas (E, N) no sistema UTM, fuso 18, Hemisfério Sul, e altitude geométrica (h) para a estação CRUZ no ITRF2008, época 2013,7.

Tabela 3 – Coordenadas planas e altitude geométrica.

Dias	E (m)	N (m)	h (m)
08/09/2013	756837,395	9157997,133	236,044
09/09/2013	756837,382	9157997,133	236,034
10/09/2013	756837,388	9157997,130	236,016
11/09/2013	756837,383	9157997,136	236,044
12/09/2013	756837,381	9157997,137	236,021
13/09/2013	756837,390	9157997,133	236,013
14/09/2013	756837,409	9157997,137	236,037
15/09/2013	756837,410	9157997,140	236,028
16/09/2013	756837,385	9157997,139	236,012
17/09/2013	756837,395	9157997,124	236,010
18/09/2013	756837,391	9157997,134	236,025
19/09/2013	756837,386	9157997,134	236,019
20/09/2013	756837,377	9157997,129	236,024
21/09/2013	756837,388	9157997,130	236,023
22/09/2013	756837,381	9157997,137	236,061
23/09/2013	756837,374	9157997,131	236,012
24/09/2013	756837,383	9157997,139	236,043
25/09/2013	756837,373	9157997,132	236,009
26/09/2013	756837,393	9157997,136	236,006
27/09/2013	756837,377	9157997,135	236,002
28/09/2013	756837,335	9157997,140	235,999
29/09/2013	756837,368	9157997,141	236,060

A Tabela 4 apresenta as estatísticas descritivas para as amostras das componentes (E, N, h) no ITRF2008, época 2013,7.

Tabela 4 – Estatísticas para as coordenadas (E, N, h) obtidas nas diferentes estações para sessões de observação de 4h, 6h e 24h.

Estações		M (m)	AT (m)	DP (m)	CV (%)
4 h CRUZ	E	756837,384	0,075	0,015	1,986E-06
	N	9157997,135	0,017	0,004	4,605E-08
	h	236,025	0,061	0,018	0,007
6 h CRUZ	E	756837,381	0,035	0,009	1,150E-06
	N	9157997,134	0,014	0,004	4,123E-08
	h	236,021	0,042	0,012	0,005
24 h CRUZ	E	756837,380	0,008	0,002	2,602E-07
	N	9157997,137	0,006	0,002	1,664E-08
	h	236,015	0,017	0,004	0,002

4h IMBT	E	730029,424	0,042	0,009	1,179E-06
	N	6874555,896	0,019	0,005	7,367E-08
	h	31,368	0,049	0,010	0,033
6h IMBT	E	730029,423	0,015	0,005	6,825E-07
	N	6874555,896	0,018	0,004	6,071E-08
	h	31,365	0,047	0,012	0,039
24h IMBT	E	730029,424	0,008	0,002	2,435E-07
	N	6874555,896	0,008	0,002	2,481E-08
	h	31,367	0,016	0,005	0,016
4h IMPZ	E	223300,660	0,032	0,008	3,758E-06
	N	9392399,002	0,020	0,004	4,191E-08
	h	104,992	0,079	0,019	0,018
6h IMPZ	E	223300,670	0,014	0,003	1,556E-06
	N	9392399,004	0,018	0,004	4,059E-08
	h	104,997	0,051	0,011	0,011
24h IMPZ	E	223300,668	0,006	0,002	7,133E-07
	N	9392399,006	0,006	0,001	1,405E-08
	h	104,991	0,019	0,005	0,005
4h MGIN	E	363219,681	0,040	0,008	2,159E-06
	N	7531310,123	0,018	0,005	6,779E-08
	h	883,704	0,050	0,012	0,001
6h MGIN	E	363219,680	0,017	0,005	1,381E-06
	N	7531310,123	0,017	0,003	4,373E-08
	h	883,702	0,030	0,009	0,001
24h MGIN	E	363219,682	0,007	0,002	4,647E-07
	N	7531310,124	0,004	0,001	1,499E-08
	h	883,694	0,018	0,005	0,001
4h POAL	E	488457,513	0,041	0,008	1,729E-06
	N	6673004,214	0,018	0,004	6,629E-08
	h	76,739	0,037	0,009	0,011
6h POAL	E	488457,512	0,017	0,005	1,028E-06
	N	6673004,215	0,019	0,004	6,024E-08
	h	76,739	0,042	0,011	0,014
24h POAL	E	488457,512	0,009	0,002	4,819E-07
	N	6673004,214	0,006	0,002	2,248E-08
	h	76,737	0,024	0,006	0,008

Em que: Média (M), Amplitude Total (AT) e Desvio Padrão (DP) em metros; Coeficiente de Variação (CV) em porcentagem. Os valores das estatísticas foram calculados considerando os valores obtidos para cada componente posicional no período de 22 dias.

A partir das AT disponíveis na Tabela4, considerando as cinco estações podem-se obter as variabilidades médias das altitudes geométricas (h), as quais são: 0,055 m para 4h, 0,042 m para 6h e 0,019 m para 24h. Desse modo, verifica-se que aumentando a duração de coleta de dados de 4h para 6h e 24h houve diminuição de 0,013 m para 6h e 0,036 m para 24h da variabilidade média dada pela AT.

Observa-se a partir do desvio padrão médio das altitudes geométricas, diminuição da variabilidade média de 0,003 m para 6h e 0,009 m para 24h em relação a 4h de coleta de dados. Em relação aos CV, nota-se que na média, não

houve uma melhora na mudança de 4h para 6h de coleta de dados, mas detecta-se diminuição de 0,014% para 0,006% quando da utilização de 24 horas de dados.

As AT médias encontradas para a componente planimétrica E foram 0,046 m para 4h, 0,020 m para 6h e 0,008 para 24h. Desse modo, observa-se uma diminuição da AT média de 0,026 m para 6h e de 0,038 m para 24h em relação a 4h de dados coletados. Em relação aos desvios padrão médio, observam-se valores de 0,010 m para 4h, 0,005 m para 6h e 0,002 m para 24h.

As AT médias encontradas para a componente planimétrica N foram 0,018 m para 4h, 0,017 m para 6h e 0,006 m para 24h. Observa-se que a AT média diminui de 0,001 m com a mudança de duração da sessão de observação de 4h para 6h e 0,012 m para 24h. O desvio padrão médio foi de 0,004 m para 4h e 6h e de 0,002 m para 24h. Nota-se a partir dos resultados, que na média, a variabilidade da componente E é maior do que a componente N.

A Tabela 5 apresenta os resultados do teste de normalidade com o emprego de Shapiro-Wilk.

Tabela 5 – P-valor para cada componente posicional.

Estações	Componentes	p - valor		
		4h	6h	24h
Cruz	E	0,011*	0,959	0,208
	N	0,574	0,244	0,012*
	h	0,216	0,342	0,041*
IMBT	E	0,000*	0,070	0,001*
	N	0,330	0,566	0,227
	h	0,234	0,463	0,129
IMPZ	E	0,819	0,913	0,213
	N	0,112	0,029*	0,201
	h	0,011*	0,998	0,866
MGIN	E	0,002*	0,291	0,220
	N	0,473	0,042*	0,036*
	h	0,175	0,556	0,875
POAL	E	0,000*	0,135	0,190
	N	0,853	0,216	0,040*
	h	0,995	0,570	0,912

*Significativo para $\alpha = 0,05$: população não segue uma distribuição normal.

Pode-se verificar que nem todas as componentes (E, N, h) das estações são provenientes de uma distribuição normal a 5% de significância com a aplicação do teste de Shapiro-Wilk. Porém, a 1% de significância aumenta o número de componentes advindas de população normal.

Na Tabela 6 são apresentados os valores da acurácia planimétrica dada pelo EQM_p , o Erro Planimétrico Médio (EPM), o desvio padrão do erro planimétrico (DPEP), o erro altimétrico médio (EAM) e o desvio padrão do erro altimétrico (DPEA).

Tabela 6 - Valores, em metros, de acurácia e medidas de precisão.

Estações	Tempo de Coleta	EQM _p	EPM	DPEP	EAM	DPEA
CRUZ	4h	0,015	0,011	0,011	-0,003	0,018
	6h	0,010	0,008	0,005	-0,007	0,012
	24h	0,005	0,004	0,002	-0,013	0,004
IMBT	4h	0,010	0,008	0,007	-0,003	0,010
	6h	0,008	0,007	0,003	-0,007	0,012
	24h	0,005	0,005	0,002	-0,004	0,005
IMPZ	4h	0,016	0,015	0,007	0,001	0,019
	6h	0,007	0,006	0,003	0,006	0,011
	24h	0,005	0,005	0,002	0,000	0,005
MGIN	4h	0,013	0,011	0,007	0,006	0,012
	6h	0,011	0,010	0,005	0,004	0,009
	24h	0,009	0,008	0,001	-0,004	0,005
POAL	4h	0,013	0,010	0,008	-0,007	0,009
	6h	0,012	0,011	0,005	-0,006	0,011
	24h	0,011	0,010	0,002	-0,009	0,006

Comparando os valores médios das acurácias planimétricas (EQM_p) para as cinco estações, verifica-se que aumentando o período de coleta dos dados de 4h para 6h e 24h há uma melhora na qualidade do posicionamento de 28,36% (0,004 m) e 47,76% (0,006 m), respectivamente. Nota-se melhora 27,08% (0,003 m) quando da utilização de 24h de dados em relação à 6h.

Os erros planimétricos máximo e mínimo encontrados foram, respectivamente, 0,015 m e 0,008 m para 4 h, 0,011 m e 0,006 m para 6 h e de 0,010 m e 0,004 m para 24 h. Para 4h de dados, o erro planimétrico médio foi de 0,011 m, 0,008 m para 6h e 0,006 m para 24h.

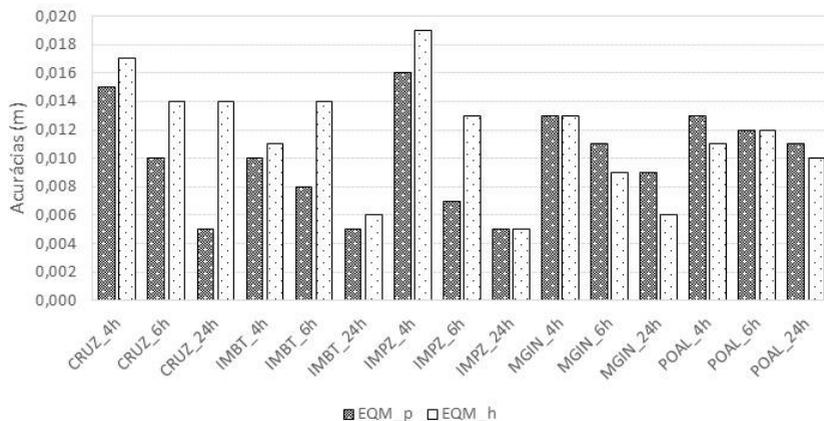
A Figura 2 ilustra os valores de acurácia planimétrica e altimétrica obtidas para os tempos de coletas de 4, 6 e 24 horas, para as estações CRUZ, IMBT, IMPZ, MGIN e POAL.

A partir da Figura 2, nota-se uma melhora na acurácia planimétrica em todas as estações com o aumento da duração da coleta dos dados. O mesmo não ocorreu com a acurácia altimétrica.

As acurácias planimétricas máxima e mínima foram, respectivamente, 0,016 m e 0,010 m para 4h, 0,012 m e 0,007 m para 6h e 0,011 m e 0,005 m para 24h. A acurácia planimétrica média para 4 h de coleta de dados foi de 0,013 m, 0,010 m para 6h e de 0,007 m para 24h, considerando as acurácias planimétricas média de cada estação.

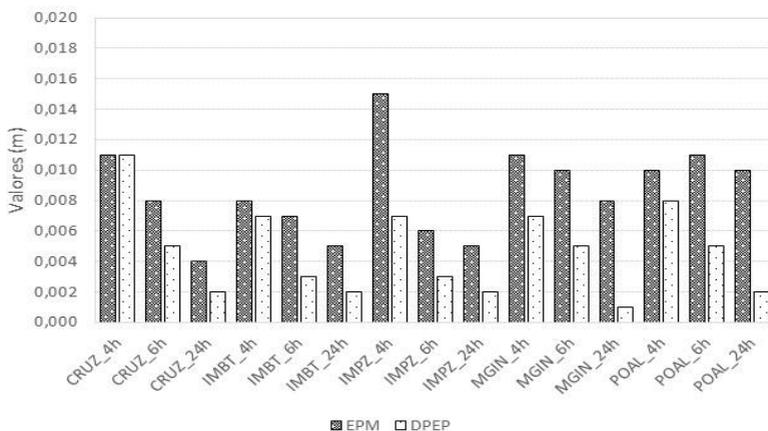
As acurácias altimétricas máximas e mínimas para 4h foram, respectivamente, 0,019 m e 0,011m; 0,014 m e 0,009 m para 6 h e de 0,014 m e 0,005 m para 24h. A acurácia altimétrica média para 4 h de coleta de dados foi de 0,014 m, para 6h foi de 0,012 m e para 24h foi de 0,008 m.

Figura 2 – Acurácias planimétrica e altimétrica.



A Figura 3 ilustra os erros planimétricos médios e os desvios padrão dos erros planimétricos em cada estação e duração da coleta dos dados.

Figura 3 - Erro planimétrico médio e desvio padrão do erro planimétrico.



Percebe-se diminuição da variabilidade do erro planimétrico com o aumento do tempo de coleta dos dados.

Os Intervalos de Confiança de 95%, em metros, para as médias populacionais das componentes (E, N, h) das cinco estações para coleta de dados de 4h, 6h e 24h e os resultados da análise de tendência estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – IC de 95% para as médias populacionais

Estações		IC para a média		
		4h	6h	24h
CRUZ	E	756837,377; 756837,390*	756837,377; 756837,385*	756837,380; 756837,381
	N	9157997,133; 9157997,136*	9157997,133; 9157997,136*	9157997,136; 9157997,137
	h	236,017; 236,032*	236,015; 236,026	236,013; 236,017
IMBT	E	730029,420; 730029,428*	730029,421; 730029,426*	730029,423; 730029,425*
	N	6874555,894; 6874555,898	6874555,894; 6874555,898	6874555,896; 6874555,897
	h	31,363; 31,373*	31,359; 31,370	31,365; 31,369
IMPZ	E	223300,657; 223300,664	223300,668; 223300,671	223300,667; 223300,669
	N	9392399,001; 9392399,004	9392399,002; 9392399,006	9392399,006; 9392399,007
	h	104,983; 105,000*	104,992; 105,002	104,989; 104,993*
MGIN	E	363219,678; 363219,685	363219,678; 363219,682	363219,681; 363219,683
	N	7531310,120; 7531310,125	7531310,122; 7531310,125	7531310,123; 7531310,124
	h	883,698; 883,709	883,698; 883,706*	883,692; 883,696
POAL	E	488457,509; 488457,517	488457,509; 488457,514	488457,511; 488457,513
	N	6673004,212; 6673004,216	6673004,213; 6673004,216	6673004,213; 6673004,214
	h	76,735;76,743	76,735; 76,744	76,734; 76,740

*Tendência não significativa para $\alpha = 0,05$.

A tendência pôde ser avaliada verificando se os valores das componentes posicionais tomadas como referência, disponíveis na Tabela 1, estavam contidos em cada intervalo de confiança de 95% para a média populacional.

Pode-se verificar na Tabela 7 que aproximadamente 13,3 % das componentes (E, N, h) apresentaram tendência não significativa para $\alpha = 0,05$ para 24h de coleta de dados.

Nos casos onde as tendências não foram significativas para $\alpha = 0,05$ de significância, os valores de precisão se igualam aos valores calculados para as acurácias. Para as componentes que apresentaram tendência significativa o valor da REQM representa, de fato, a acurácia posicional, na qual envolve não apenas efeitos aleatórios, mas também efeitos sistemáticos dados pelas tendências.

Na Tabela 8 são apresentadas duas outras formas de representar os valores da acurácia, dados por (m) e EQM obtidos para as componentes (E, N, h), com o uso da equação (16) (com extração da raiz quadrada) e com as equações (7), (8) e (13).

Tabela 8 - Medidas de acurácia, em metros, para cada componente posicional das estações sob diferentes tempos de coleta de dados.

Estações		Tempo de Coleta	b	S _b	m (Eq. 16)	EQM (Eq. 7,8 e 13)
C R U Z	E	4h	0,000	0,015	0,015	0,015
	N		0,000	0,004	0,004	0,004
	h		-0,003	0,018	0,018	0,017
	E	6h	-0,003	0,009	0,009	0,009
	N		-0,001	0,004	0,004	0,004
	h		-0,007	0,012	0,014	0,014
	E	24h	-0,004	0,002	0,004	0,004
	N		0,002	0,002	0,002	0,002
	h		-0,013	0,004	0,014	0,014
I M B I T	E	4h	0,000	0,009	0,009	0,008
	N		0,004	0,005	0,006	0,006
	h		-0,003	0,010	0,011	0,011
	E	6h	-0,001	0,005	0,005	0,005
	N		0,004	0,004	0,006	0,006
	h		-0,007	0,012	0,014	0,014
	E	24h	0,000	0,002	0,002	0,002
	N		0,004	0,002	0,005	0,005
	h		-0,004	0,005	0,006	0,006
I M P Z	E	4h	-0,013	0,008	0,015	0,015
	N		-0,005	0,004	0,006	0,006
	h		0,001	0,019	0,019	0,019
	E	6h	-0,004	0,003	0,005	0,005
	N		-0,003	0,004	0,005	0,005
	h		0,006	0,011	0,013	0,013
	E	24h	-0,005	0,002	0,005	0,005
	N		-0,001	0,001	0,002	0,002
	h		0,000	0,005	0,005	0,005
M G I N	E	4h	-0,008	0,0082	0,011	0,011
	N		0,004	0,005	0,006	0,006
	h		0,006	0,012	0,013	0,013
	E	6h	-0,009	0,005	0,010	0,010
	N		0,004	0,003	0,005	0,005
	h		0,004	0,009	0,010	0,009
	E	24h	-0,007	0,002	0,007	0,007
	N		0,005	0,001	0,005	0,005
	h		-0,004	0,005	0,006	0,006

P O A L	E	4h	-0,008	0,0088	0,012	0,012
	N		-0,004	0,004	0,006	0,006
	h		-0,007	0,009	0,011	0,011
	E	6h	-0,009	0,005	0,011	0,011
	N		-0,003	0,004	0,005	0,005
	h		-0,006	0,011	0,012	0,012
	E	24h	-0,009	0,002	0,010	0,010
	N		-0,004	0,002	0,004	0,004
	h		-0,009	0,006	0,011	0,010

A partir dos valores presentes na Tabela 8, percebe-se que na medida que aumenta a duração da coleta dos dados, os valores diminuem, isto é, aumenta a acurácia no posicionamento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Para que o AUSPOS seja utilizado para posicionamento no Brasil deve-se realizar a transformação de referencial das coordenadas obtidas no ITRF2008 (IGb08) para o SIRGAS2000, o qual é o sistema de referência adotado pelo SGB. Recomenda-se determinar as velocidades das estações com o uso do modelo de velocidade VEMOS2009, adotado pelo IBGE, para atualizar das coordenadas da época do rastreamento para a época 2000,4.

Para aplicação do teste *t* de Student é necessário que as observações que compõem a amostra sejam independentes e provenientes de uma população com distribuição gaussiana (normal). Foi verificado que nem todas as populações são gaussianas com a utilização do teste não paramétrico de Shapiro-Wilk (para $n \leq 50$). Isso passa a ser uma limitação na aplicação dessa ferramenta.

Pôde-se verificar que o aumento do tempo de coleta proporciona melhora na medida de acurácia das componentes do vetor posição, o que reflete diretamente na qualidade da determinação posicional.

Os resultados indicam que o posicionamento com o uso do AUSPOS possibilita determinação de acurácias planimétrica e altimétrica centimétrica para 4h e 6h de coleta de dados e sub-centimétrica para 24h. Assim, verifica-se que esse serviço poderá ser utilizado para densificação de redes geodésicas e determinação de pontos de controle para execução de levantamentos georreferenciados.

Recomenda-se a realização de novos experimentos considerando uma amostra com tamanho maior que a utilizada (22). E verificação da normalidade e independência das discrepâncias posicionais das componentes (E, N, h) de modo que seja possível a determinação das acurácias planimétricas e altimétricas com nível de confiança de 95%, conforme especificações encontradas em FGDC (1998).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIYANTO, F.H., ROBERTS, C.A., 2007. *Temporary CORS networks for land reconstruction in Aceh, Sumatera. IGNS2007 Symp. on GPS/GNSS*, Sydney,

- Australia, 4-6 December, paper 54, CD-ROM procs. Disponível em: <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/about/publications_author.htm> Acesso em: 22 jan. 2014.
- ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L. *Analysis and results of ITRF2008* - IERS Technical Note No. 37. IERS. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, p. 54. 2012.
- AUSPOS - Online GPS Processing Service. Australia Geoscience: *Applying geoscience to Australia's most important challenges*, 2014. Disponível em: <<http://www.ga.gov.au/earth-monitoring/geodesy/auspos-online-gps-processing-service.html>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- DAWSON, J., GOVIND, R., MANNING, J. Application of the AUSLIG Online GPS Processing System (AUSPOS) to Antarctica, *Proceeding of Satnav2001*, Canberra, July 2001. Disponível em: <www.ga.gov.au/image_cache/GA5057.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- EL-MOWAFY, A. *Analysis of web-based gnss post-processing services for static and kinematic positioning using short data spans*. Survey Review, 43, October 2011. 535-549. Disponível em: <<http://www.maneyonline.com/loi/sre>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE – FGDC. *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. United States. 1998.
- GHODDOUSI-FARD, R.; DARE, P. *Online GPS processing services: an initial study*. GPS Solutions, 0, 2006. 10 - 20. Disponível em: <http://folk.uio.no/treiken/GEO4530/Online_GPS_posisitoning_services.pdf> . Acesso em: 22 jan. 2014.
- GEOSCIENCE AUSTRALIA. Australian Government - <http://www.ga.gov.au/earth-monitoring/geodesy/auspos-online-gps-processing-service.html>. 2014. Acesso em: 22 jan. 2014.
- GOMEZ, M. E.; COGLIANO, D.; TELLO, M. N. R. *Análisis de la performance de tres servicios de posicionamiento GPS online en Argentina*. Geoacta, Argentina, 38, n. 2, 2013. 95-106. Disponível em: <<http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/geoacta/index>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/default.php>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- IERS. *International Earth Rotation and Reference Systems Service*, 2014. Disponível em: <http://www.iers.org/IERS/EN/IERSHome/home.html?_nnn=true>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- IGS. *International GNSS Service*, 2014. Disponível em < <http://www.igs.org/> >. Acesso em: 15 fev. 2014.
- ITRF. *International Terrestrial Referece Frame*, 2014. Disponível em: <<http://itrf.ensg.ign.fr/>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- MIKHAIL, E. M.; ACKERMANN, F. *Observation and Least Squares*. New York IEP, Dun-Donnelly Publisher, 1976.

- MONICO, J.F.M.; PÓZ, A.P.D.; GALO, M.; SANTOS, M.C.; OLIVEIRA, L.C. *Acúria e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada*. Bol. Ciênc. Geod., séc. Comunicações, Curitiba, vol. 15, nº 3, p.469-483, jul-set, 2009.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Tradução de Verônica Caldo. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 490 p.
- OCALAN, T.; ERDGAN, ; TUNALIOGLU, N. *Analysis of web-based online services for gps relative and precise point positioning techniques*. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, 19, n. 2, abr-jun 2013. 191-207. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- PETIT, G.; LUZUM, B. IERS Conventions (2010) - *IERS Technical Note 36*. IERS. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, p. 179. 2010.
- R Development Core Team (2009). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0,
URL <http://www.R-project.org>.
- REBISCHUNG, P. et al. *IGS08: the IGS realization of ITRF2008*. GPS Solutions, 16, 2012. 483-494.
- REBISCHUNG, P. [IGSMail - 6663] IGB08: an update on IGS08. Disponível em: <<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2012/007853.html>>. Acesso em: 22 fev. 2014.
- SIRGAS. Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, 2014. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=15>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- TSAKIRI, M. *GPS Processing using online services*. Journal of Surveying Engineering, 134, n. 4, November 2008. 115-125. Disponível em: <<http://asc.library.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9453%282008%29134%3A4%28115%29>>. Acesso em: 22 jan. 2014.

(Recebido em junho de 2014. Aceito em outubro de 2014).

COMO ESTIMAR O PODER DO TESTE MÍNIMO E VALORES LIMITES PARA O INTERVALO DE CONFIANÇA DO DATA SNOOPING

How to estimate the minimum power of the test and bound values for the confidence interval of Data Snooping procedure

IVANDRO KLEIN^{1,2}
MARCELO TOMIO MATSUOKA^{1,2}
MATHEUS PEREIRA GUZATTO¹

¹Laboratório de Pesquisas em Geodésia (LAGEO)/Departamento de Geodésia/Instituto de Geociências – UFRGS

²Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970,
Cx. Postal 15001, Porto Alegre, RS, Brasil
ivandroklein@gmail.com; tomiomatsuoka@gmail.com;
matheusguzatto@gmail.com

RESUMO

O *Data Snooping* (DS) é o método mais bem estabelecido para identificar erros grosseiros (*outliers*) em dados geodésicos, com uma determinada probabilidade. O poder do teste do DS é a probabilidade deste identificar corretamente um erro grosseiro, enquanto o intervalo de confiança do DS é a probabilidade deste não rejeitar uma observação não contaminada por erro grosseiro. Na prática, o poder do teste é sempre desconhecido. Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão teórica sobre como determinar o poder do teste mínimo e valores limites para o intervalo de confiança do DS, em um cenário n -dimensional, ou seja, considerando todas as observações envolvidas. Além da revisão teórica, um exemplo numérico envolvendo uma rede de nivelamento geométrico simulada é apresentado. Os resultados obtidos nos experimentos foram concordantes com os valores teóricos previamente calculados, ou seja, a metodologia revista apresentou desempenho satisfatório na prática. O exemplo apresentado também evidencia a

importância da metodologia revista na etapa de planejamento (ou pré-análise) de redes geodésicas.

Palavras-chave: Poder o Teste; Intervalo de Confiança; Data Snooping.

ABSTRACT

Data Snooping (DS) is the best-established method to identify gross errors (outliers) in geodetic data analysis, with a given probability. The power of the test is the probability of DS correctly identifying a gross error, while the confidence interval is the probability of DS not rejecting an observation uncontaminated by gross error. In practice, the power of the test is always unknown. Thus, the objective of this paper is to present a theoretical review of how to determine the minimum power of the test, and bound values for the confidence interval of the DS procedure in an n -dimensional scenario, i.e., considering all observations involved. Along with the theoretical review, a numerical example involving a simulated leveling network is presented. The results obtained in the experiments agreed with the previously calculated theoretical values, i.e., the revised methodology showed satisfactory performance in practice. The example also shows the importance of the revised methodology in the planning stage (or pre-analysis) of geodetic networks.

Keywords: Power of the Test; Confidence Interval; Data Snooping.

1. INTRODUÇÃO

O *Data Snooping* (DS) é o método mais estabelecido para identificar *outliers* em dados geodésicos (LEHMANN, 2012). O DS é um procedimento iterativo de testes estatísticos que identifica observações suspeitas de estarem contaminadas por erros grosseiros (*outliers*), inicialmente proposto em Baarda (1968), e que será descrito em detalhes na próxima seção.

Um teste estatístico consiste em dividir o espaço amostral (conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento) em duas partes, denominadas região de rejeição (região crítica) e região de aceitação (ou de não rejeição) da hipótese de teste (ou hipótese nula). Se a estatística calculada, em função da amostra, se situar dentro da região crítica, rejeita-se a hipótese em questão. Caso contrário, não há evidências, na amostra observada, para rejeitar a hipótese nula (LARSON, 1974).

Portanto, quando o teste de uma hipótese estatística é realizado e uma decisão é tomada, pode-se cometer dois tipos de erro na decisão (LARSON, 1974):

- Erro Tipo I: Rejeitar a hipótese de teste quando esta é de fato verdadeira;
- Erro Tipo II: Não rejeitar a hipótese de teste quando esta de fato é falsa;

A probabilidade de cometer o Erro Tipo I é dada por α (nível de significância do teste), e a probabilidade de cometer o Erro Tipo II é dada por β . Designando a hipótese que se deseja testar por H_0 (hipótese nula), estas definições são formalmente definidas por (LARSON, 1974):

$$\begin{cases} \alpha = P(\text{erro tipo I}) = P(\text{rejeitar } H_0 | H_0 \text{ verdadeira}) \\ \beta = P(\text{erro tipo II}) = P(\text{não rejeitar } H_0 | H_0 \text{ falsa}) \end{cases}$$

No caso do procedimento DS, a hipótese nula (H_0) é a ausência de erros grosseiros nas observações, e para cada i -ésima observação do conjunto de dados, defini-se uma hipótese alternativa (H_i) como sendo a presença de erro grosseiro nesta i -ésima observação testada (BAARDA, 1968; TEUNISSEN, 2006). Ou seja, o DS é um procedimento de teste estatístico que possui múltiplas hipóteses alternativas a hipótese nula (no caso, existência de um único erro grosseiro para cada i -ésima observação testada individualmente).

Desta forma, por ser um procedimento de teste estatístico, e pelo fato que este considera somente uma observação suspeita de estar contaminada por erro grosseiro por vez (isto é, são múltiplas hipóteses alternativas a hipótese nula, uma para cada observação), o DS está sujeito a três tipos de erros (FÖRSTNER, 1983):

- Erro Tipo 1: Identificar (erroneamente) uma observação como contendo erro grosseiro (isto é, rejeitar H_0 quando H_0 é verdadeira);
- Erro Tipo 2: Não identificar (erroneamente) uma observação como contendo erro grosseiro (isto é, não rejeitar H_0 , ou em outras palavras, rejeitar H_i , quando H_0 é falsa, ou de maneira análoga, H_i é verdadeira);
- Erro Tipo 3: Identificar (erroneamente) uma outra observação como contendo erro grosseiro, enquanto a observação contaminada não foi identificada (isto é, aceitar uma hipótese alternativa H_j falsa, enquanto a hipótese alternativa verdadeira H_i não foi aceita).

Além desses três tipos de erros, tem-se ainda o intervalo de confiança (IC), que é a probabilidade de não rejeitar a hipótese nula (H_0), quando a hipótese nula é verdadeira, e o poder do teste (γ), que é a probabilidade de rejeitar a hipótese nula (ou em outras palavras, aceitar a hipótese alternativa), quando a hipótese nula é falsa (ou de maneira análoga, a hipótese alternativa é verdadeira) (LARSON, 1974).

Como no caso do DS, tem-se n hipóteses alternativas a hipótese nula (uma para cada observação testada), para cada observação, o intervalo de confiança (IC) se torna a probabilidade desta observação, caso não contaminada por erro grosseiro, não ser identificada como *outlier*, e o poder do teste (γ) se torna a probabilidade desta observação, caso contaminada por erro grosseiro, ser identificada como *outlier* (ver, por exemplo, BAARDA, 1968, KAVOURAS, 1982, TEUNISSEN, 2006).

O poder do teste (γ), naturalmente, é sempre desconhecido na prática, mas a sua relação com os resultados obtidos aplicando o DS foi estudada inicialmente em Baarda (1968), onde o mesmo autor propõe as chamadas medidas de confiabilidade para o DS, mas considerando apenas os efeitos do Erro Tipo 1 e do Erro Tipo 2 do teste (ou seja, desconsiderando a ocorrência do Erro Tipo 3).

Förstner (1983) estudou a relação do Erro Tipo 1, do Erro Tipo 2 e do Erro Tipo 3 no DS, mas considerando apenas duas observações por vez, adicionando na análise original de Baarda (1968) o coeficiente de correlação entre as estatísticas de teste de cada par de observações, ou seja, a chamada “análise de separabilidade”.

Considerando o fato de que o poder do teste é sempre desconhecido na prática, Yang et al. (2013), utilizando os estudos de Förstner (1983), propõem uma forma de se estimar o "poder do teste mínimo" do DS, mas nesta abordagem, considerando todas as observações envolvidas, ao invés de cada par de observações separadamente, além de definir valores máximos e mínimos para o intervalo de confiança do DS (também considerando todas as observações envolvidas).

A análise dos erros tipo 1, 2 e 3, e, consequentemente, do intervalo de confiança e do poder do teste, é muito importante na etapa de controle de qualidade de redes geodésicas, pois, considerando os custos do projeto e a qualidade (acurácia) final desejada para a rede, espera-se que apenas as observações de fato contaminadas por erros grosseiros sejam devidamente identificadas nesta etapa.

Além disso, na própria fase de planejamento ou pré-análise da rede, pode-se desejar que a mesma, em função da precisão e geometria/redundância das observações, tenha uma proteção razoável para os erros tipo 1, 2 e 3, ou seja, que a magnitude esperada para estes esteja dentro de uma determinada "margem de segurança" estipulada.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar como se estima o poder do teste mínimo do procedimento DS, bem como valores limites para o intervalo de confiança deste, por meio da exposição teórica sobre o tema, além da aplicação e comprovação da metodologia em um exemplo numérico empregando o método Monte Carlo em uma rede de nivelamento geométrico.

É importante ressaltar que existem métodos alternativos à detecção de erros grosseiros em redes geodésicas por meio de testes estatísticos como o DS, dentre os quais se pode citar os métodos de estimação robusta (ver, por exemplo, KOCH, 1999), métodos de inferência bayesiana (ver, por exemplo, GUI et al., 2011), e o método QUAD (ver, por exemplo, GUO et al., 2007).

2. O PROCEDIMENTO DE TESTE *DATA SNOOPING*

No caso do procedimento de teste *Data Snooping*, proposto em Baarda (1968), inicialmente, considera-se o seguinte modelo linear de ajustamento:

$$Lb = Ax + e, \quad (1)$$

onde na Expressão 1, Lb é o vetor das n observações, x é o vetor dos u parâmetros incógnitos do modelo (no caso de redes geodésicas, as coordenadas dos vértices), A é a matriz *design* do ajustamento (ou matriz jacobiana), e e é o vetor dos n erros aleatórios das observações.

Para os casos em que o modelo matemático é inicialmente não linear em relação aos parâmetros, deve-se utilizar o modelo linearizado de Gauss-Markov (ver, por exemplo, GUO et al., 2007).

Na Expressão 1, assumindo que a esperança matemática dos erros aleatórios é igual ao vetor nulo ($E\{e\} = 0$), ou seja, por serem de natureza aleatória, estes erros não apresentam tendência, para cada i -ésima observação (lb_i) do vetor das n

observações (Lb), pode-se formular as seguintes hipóteses de teste (BAARDA, 1968; TEUNISSEN, 2006):

$$H_0: E\{Lb\} = Ax \quad \text{contra} \quad (2)$$

$$H_A: E\{Lb\} = Ax + c_i \nabla_i, \quad \nabla_i \neq 0,$$

onde na Expressão 2, c_i é um vetor unitário contendo a unidade na linha da i -ésima observação testada e zero nas demais linhas, ou seja: $c_i = \left[0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad \underbrace{1}_i \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right]_{nx1}^T$, e ∇_i é um (possível) erro grosseiro na i -ésima observação testada.

Desta forma, na hipótese nula (H_0), assume-se que não existe erro grosseiro nas observações, enquanto na hipótese alternativa (H_A), assume-se que a i -ésima observação testada (lb_i) está contaminada por um erro grosseiro de magnitude ∇_i .

A hipótese nula é rejeitada (ou em outras palavras, a hipótese alternativa é aceita), se a estatística de teste da i -ésima observação testada (w_i) exceder o seguinte valor crítico (BAARDA, 1968; TEUNISSEN, 2006):

$$w_i = \frac{c_i^T P v}{\sqrt{c_i^T P \Sigma_v P c_i}}; \quad |w_i| > c_{\alpha_0/2}, \quad (3)$$

onde na Expressão 3, P é a matriz peso do ajustamento, v é o vetor dos resíduos ajustados, Σ_v é a matriz de covariância dos resíduos ajustados, e $c_{\alpha_0/2}$ é o valor crítico teórico na distribuição normal padrão, para um dado nível de significância α_0 (teste bi-lateral).

Na prática, adota-se um nível de significância para o teste (como por exemplo, $\alpha_0 = 0,001$ ou $\alpha_0 = 0,01$), em função do qual se obtém o valor crítico teórico ($c_{\alpha_0/2}$), e testam-se todas as observações individualmente (ou seja, $i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Como cada observação é testada individualmente, a (única) observação considerada contaminada por erro grosseiro será aquela cuja estatística de teste w_i satisfazer as seguintes condições (BAARDA, 1968; TEUNISSEN, 2006):

$$\begin{cases} |w_i| > c_{\alpha_0/2} \\ |w_i| > |w_j|, \quad \forall i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

Identificada a observação suspeita de estar contaminada por erro grosseiro, segundo o nível de significância estipulado (α_0), usualmente, exclui-se a mesma do conjunto de dados e repete-se o ajustamento e o procedimento de teste DS até que todas as observações suspeitas sejam devidamente identificadas, em um processo

iterativo de ajustamento, identificação e remoção de erros grosseiros (um por vez).

Para mais detalhes sobre este procedimento, ver, por exemplo, Baarda (1968), Kavouras (1982), Koch (1999), Teunissen (2006) e Lehmann (2012).

3. NÍVEIS DE PROBABILIDADE ASSOCIADOS AO DATA SNOOPING CONSIDERANDO DUAS HIPÓTESES ALTERNATIVAS

Conforme já mencionado, ao se aplicar o procedimento de teste DS, podem ocorrer três tipos de decisões falsas: Identificar (erroneamente) uma observação como contendo erro grosseiro (Erro Tipo 1); não identificar (erroneamente) uma observação como contendo erro grosseiro (Erro Tipo 2); e identificar (erroneamente) uma observação como contendo erro grosseiro, enquanto a observação contaminada não foi identificada (Erro Tipo 3).

A probabilidade de cometer o Erro Tipo 1 é chamada de nível de significância do teste e é dada por α ; a probabilidade de cometer o Erro Tipo 2 é dada por β ; e a probabilidade de cometer o Erro Tipo 3 é dada por κ .

Em contrapartida, o intervalo de confiança (IC) é o complemento do Erro Tipo 1, ou seja, é a probabilidade de não identificar (corretamente) uma observação como contendo erro grosseiro ($IC = 1 - \alpha$), enquanto o poder do teste, designado por γ , é o complemento da soma das probabilidades do Erro Tipo 2 e do Erro Tipo 3 ($\gamma = 1 - (\beta + \kappa)$), ou seja, é a probabilidade de identificar (corretamente) uma observação como contendo erro grosseiro.

Portanto, o intervalo de confiança e o poder do teste são as probabilidades do resultado do teste conduzir a decisões corretas, ao contrário da ocorrência dos erros tipo 1, 2 e 3 (para mais detalhes, ver, por exemplo, FÖRSTNER, 1983; TEUNISSEN, 2006). Quando o valor para a probabilidade do Erro Tipo 1, do Erro Tipo 2 ou do poder do teste é pré-definido/estipulado, este valor é designado por α_0 , β_0 ou γ_0 , respectivamente.

Desta forma, considerando inicialmente o caso unidimensional envolvendo uma única observação testada e a sua estatística de teste w_i no DS (ou seja, desconsiderando a ocorrência do Erro Tipo 3), uma visualização do intervalo de confiança, do poder do teste, do nível de significância e do Erro Tipo 2 é obtida por meio da Figura 1 (neste caso, os valores assumidos para estes níveis de probabilidade são: $\alpha_0 = 0,001$; $IC = 1 - \alpha_0 = 0,999$; $\beta_0 = 0,20$; e $\gamma_0 = 1 - \beta_0 = 0,80$).

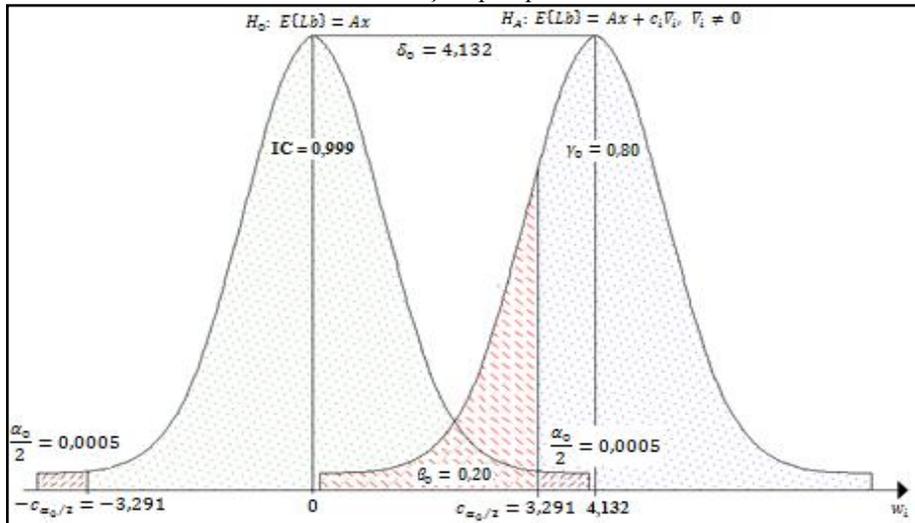
Analisando a Figura 1, nota-se que, aumentando o nível de significância (α_0) do DS, e conseqüentemente, diminuindo o valor crítico teórico ($c_{\alpha_0/2}$) e o intervalo de confiança (IC), aumenta-se o poder do teste (γ_0), ou analogamente, diminui-se a probabilidade do Erro Tipo 2 (β_0).

Em contrapartida, diminuindo o nível de significância do DS, e conseqüentemente, aumentando o valor crítico teórico e o intervalo de confiança, diminui-se o poder do teste, ou analogamente, aumenta-se a probabilidade do Erro Tipo 2. Ou seja, na prática, não é possível minimizar, simultaneamente, as

probabilidades de cometer o Erro Tipo 1 e o Erro Tipo 2 (ou de maneira análoga, maximizar, simultaneamente, o intervalo de confiança e o poder do teste).

Além disso, analisando ainda a Figura 1, nota-se que a probabilidade do Erro Tipo 2 (β_0), e consequentemente, o poder do teste (γ_0), dependem, além do valor crítico teórico ($c_{\alpha_0/2}$), da separação entre a hipótese nula (ausência de erros grosseiros nas observações – H_0) e a hipótese alternativa (presença de erro grosseiro na i -ésima observação testada – H_A), ou seja, do parâmetro de não centralidade correspondente do modelo (δ_0).

Figura 1 – Níveis de probabilidade associados ao DS no teste de uma i -ésima observação qualquer.



Como a magnitude do (possível) erro grosseiro que contamina uma i -ésima observação testada é sempre desconhecida, na prática, arbitra-se um valor para o nível de significância (α_0) e para o poder do teste (γ_0), em função dos quais se obtém o valor para o parâmetro de não centralidade do modelo correspondente (δ_0). Para mais detalhes sobre esta abordagem, ver, por exemplo, Baarda (1968), Kavouras (1982), Koch (1999) e Teunissen (2006).

Considerando agora um caso bidimensional envolvendo duas observações quaisquer, cujas estatísticas de teste sejam dadas por w_i e w_j (ou seja, adicionando a probabilidade do Erro Tipo 3 no cenário unidimensional descrito anteriormente), todas as situações (e decisões) relativas ao DS podem ser reunidas de acordo com a Tabela 1.

Na Tabela 1, H_0 é a hipótese nula do DS (não existência de erros grosseiros nas observações), H_i é a hipótese alternativa para a i -ésima observação (existência

de erro grosseiro nesta), e H_j é a hipótese alternativa para a j -ésima observação (existência de erro grosseiro nesta).

Tabela 1 – Decisões associadas a duas hipóteses alternativas no DS
(Fonte: Adaptado de Yang et al., 2013).

Hipótese “aceita” no teste	Resultado do teste		
	H_0	H_i	H_j
Critério de decisão	$ w_i \leq c_{\alpha 0/2},$ $ w_j \leq c_{\alpha 0/2}$	$ w_i > c_{\alpha 0/2},$ $ w_i > w_j $	$ w_j > c_{\alpha 0/2},$ $ w_j > w_i $
Realidade (“desconhecida”)			
Hipótese nula (H_0)	Decisão correta	Erro Tipo 1	Erro Tipo 1
Probabilidade associada	$IC = 1 - \alpha_{00}$	α_{oi}	α_{oj}
Hipótese alternativa (H_i)	Erro Tipo 2	Decisão correta	Erro Tipo 3
Probabilidade associada	β_{i0}	$\gamma_{ii} = 1 - \beta_{ii}$	κ_{ij}
Hipótese alternativa (H_j)	Erro Tipo 2	Erro Tipo 3	Decisão correta
Probabilidade associada	β_{j0}	κ_{ji}	$\gamma_{jj} = 1 - \beta_{jj}$

Desta forma, α_{00} é o nível de significância “global” do DS (enquanto α_{oi} é o nível de significância apenas para o teste da i -ésima observação, e α_{oj} é o nível de significância apenas para o teste da j -ésima observação).

Além disso, β_{i0} e κ_{ij} são as probabilidades de cometer, respectivamente, o Erro Tipo 2 e o Erro Tipo 3 para a i -ésima observação, enquanto β_{j0} e κ_{ji} são as probabilidades de cometer, respectivamente, o Erro Tipo 2 e o Erro Tipo 3 para a j -ésima observação.

Finalmente, β_{ii} e γ_{ii} são, respectivamente, a soma de β_{i0} e κ_{ij} e o poder do teste para a i -ésima observação, enquanto β_{jj} e γ_{jj} são, respectivamente, a soma de β_{j0} e κ_{ji} e o poder do teste para a j -ésima observação.

As estatísticas de teste w_i e w_j de duas observações quaisquer possuem um coeficiente de correlação (ρ_{ij}), dado pela seguinte expressão (FÖRSTNER, 1983):

$$\rho_{ij} = \frac{c_i^T P \Sigma_v P c_j}{\sqrt{c_i^T P \Sigma_v P c_i} \sqrt{c_j^T P \Sigma_v P c_j}}; \quad -1 \leq \rho_{ij} \leq 1 \quad (5)$$

Além do coeficiente de correlação entre duas estatísticas de teste do DS, tem-se ainda, conforme visto anteriormente, o parâmetro de não centralidade do modelo (δ_0), que expressa a separação entre a hipótese nula e a hipótese alternativa.

No caso bidimensional aqui considerado, o parâmetro de não centralidade do modelo (δ_0) depende do nível de significância do teste (α_0), ou analogamente, do valor crítico teórico para este ($c_{\alpha_0/2}$), do poder do teste (γ_0), ou analogamente, da soma das probabilidades do Erro Tipo 2 (β_{0i}) e do Erro Tipo 3 (κ_{ij}), e também do coeficiente de correlação entre as estatísticas de teste consideradas (ρ_{ij}).

Desta forma, matematicamente, as probabilidades de cometer o Erro Tipo 1 (α_{0i}), o Erro Tipo 2 (β_{0i}) e o Erro Tipo 3 (κ_{ij}) no teste de uma i -ésima observação qualquer, considerando o coeficiente de correlação (ρ_{ij}) da estatística de teste desta (w_i) com a de uma j -ésima observação qualquer (w_j), bem como o parâmetro de não centralidade do modelo correspondente (δ_0), são dadas, respectivamente, por (FÖRSTNER, 1983):

$$\alpha_{0i} = \iint_{|w_i| > c_{\alpha_0/2}, |w_i| > |w_j|} \frac{1}{2\pi \sqrt{1-\rho_{ij}^2}} e^{-\frac{1}{2(1-\rho_{ij}^2)}[w_i^2 - 2\rho_{ij}w_iw_j + w_j^2]} dw_i dw_j \quad (6)$$

$$\beta_{i0} = \iint_{|w_i| \leq c_{\alpha_0/2}, |w_j| \leq c_{\alpha_0/2}} \frac{1}{2\pi \sqrt{1-\rho_{ij}^2}} e^{-\frac{1}{2(1-\rho_{ij}^2)}[(w_i - \mu_i)^2 - 2\rho_{ij}(w_i - \mu_i)(w_j - \mu_j) + (w_j - \mu_j)^2]} dw_i dw_j \quad (7)$$

$$\kappa_{ij} = \iint_{|w_j| > c_{\alpha_0/2}, |w_j| > |w_i|} \frac{1}{2\pi \sqrt{1-\rho_{ij}^2}} e^{-\frac{1}{2(1-\rho_{ij}^2)}[(w_i - \mu_i)^2 - 2\rho_{ij}(w_i - \mu_i)(w_j - \mu_j) + (w_j - \mu_j)^2]} dw_i dw_j \quad (8)$$

Na Expressão 6, o termo dentro da integral corresponde à função densidade de probabilidade (fdp) conjunta de w_i e w_j na hipótese nula H_0 (ausência de erros grosseiros nas duas observações), enquanto nas expressões 7 e 8, o termo dentro das integrais corresponde a fdp conjunta de w_i e w_j na hipótese alternativa H_i (existência de erro grosseiro na i -ésima observação, com $\mu_i = \delta_0$ e $\mu_j = \rho_{ij} \delta_0$).

Como as distribuições de probabilidade de w_i e w_j em H_i e H_j são simétricas, devido ao coeficiente de correlação entre estas, decorre que $\alpha_{0i} = \alpha_{0j}$, $\beta_{0i} = \beta_{0j}$, e $\kappa_{ij} = \kappa_{ji}$ (para mais detalhes, ver FÖRSTNER, 1983 e YANG et al., 2013).

4. LIMITES PARA O INTERVALO DE CONFIANÇA E PARA O PODER DO TESTE DO DATA SNOOPING NO CENÁRIO n -DIMENSIONAL

Seguindo a formulação teórica descrita anteriormente, por meio das distribuições de probabilidade resultantes, pode-se calcular o Erro Tipo 1, o Erro

Tipo 2, o Erro Tipo 3, o intervalo de confiança e o poder do teste do DS em um cenário tridimensional, tetradimensional, e até mesmo, estendendo até o caso n -dimensional, ou seja, considerando todas as n observações testadas (individualmente).

Entretanto, isto envolveria integrações numéricas n -dimensionais, o que impossibilita o seu cálculo na prática.

Desta forma, Yang et al. (2013), utilizando a abordagem bi-dimensional apresentada anteriormente, definem limites para o intervalo de confiança e para o poder do teste do DS em um cenário (geral) n -dimensional, ou seja, considerando todas as observações testadas.

Para o intervalo de confiança do DS, no cenário n -dimensional ($IC = 1 - \alpha_0$, sendo α_0 o nível de significância “global” do DS, ou seja, neste cenário n -dimensional), o IC terá como limites superior e inferior os seguintes valores (YANG et al., 2013):

$$1 - \alpha_0'' > 1 - \alpha_0 \geq (1 - \alpha_0)^n, \quad (9)$$

onde na Expressão 9, α_0'' corresponde ao nível de significância relativo ao par de estatísticas de teste com maior coeficiente de correlação (em módulo), obtido por meio da Expressão 6, n corresponde ao número total de observações, e α_0 corresponde ao nível de significância que foi arbitrado ou definido para o teste (como por exemplo, $\alpha_0 = 0,001$ ou $\alpha_0 = 0,01$), em função do qual se obtém o valor crítico teórico ($c_{\alpha_0/2}$) na distribuição normal padrão (teste bilateral).

Finalmente, para cada observação (no caso, para uma i -ésima observação qualquer), o poder do teste do DS ($\gamma_{ii} = 1 - \beta_{ii}$), no cenário n -dimensional, ou seja, considerando todas as demais observações testadas, terá como limite inferior o seguinte valor (YANG et al., 2013):

$$\gamma_{ii} = 1 - \beta_{ii} \geq 1 - (\beta_{i0}'' + \sum_{j=1, j \neq i}^n \kappa_{ij}), \quad (10)$$

onde na Expressão 10, β_{i0}'' corresponde a probabilidade do Erro Tipo 2 para a observação cuja estatística de teste apresenta o maior coeficiente de correlação (em módulo) com a estatística de teste da i -ésima observação considerada (obtida por meio da Expressão 7), e o somatório das probabilidades do Erro Tipo 3 ($\sum \kappa_{ij}$) deve ser calculado relacionando todas as demais observações (par a par) com a i -ésima observação considerada, por meio da Expressão 8.

Desta forma, o poder do teste mínimo do DS, no cenário n -dimensional (considerando todas as observações testadas), será igual ao poder do teste mínimo obtido por meio da Expressão 10, aplicada para cada observação individualmente, enquanto o intervalo de confiança mínimo do DS, neste cenário, será igual ao limite inferior dado pela Expressão 9.

Sobre estes níveis de probabilidade, é importante notar ainda que: Quanto

maior o coeficiente de correlação entre duas estatísticas de teste, maior é o tamanho do Erro Tipo 3 e menor é o tamanho do Erro Tipo 2, bem como, maior é o valor do parâmetro de não centralidade do modelo correspondente (para mais detalhes, ver, por exemplo, FÖRSTNER, 1983; YANG et al., 2013).

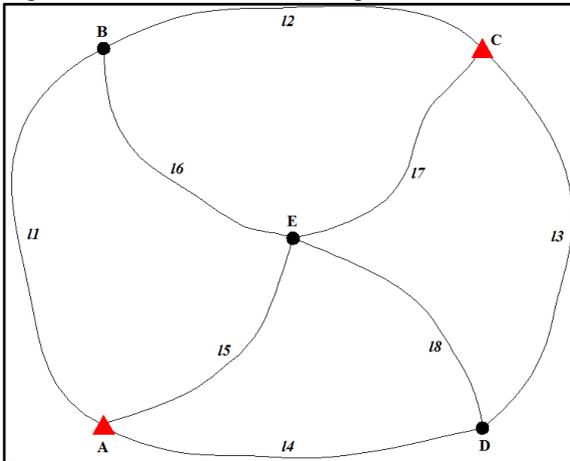
Ou seja, quanto maior o coeficiente de correlação entre duas estatísticas de teste, maior deve ser o parâmetro de não centralidade associado, e consequentemente, menor é a “separabilidade” entre estas estatísticas de teste, isto é, maior é o tamanho do Erro Tipo 3 para este par de observações.

Além disso, quanto maior o coeficiente de correlação máximo e o número total de observações (n), maior é a discrepância entre os limites dados pela Expressão 9 e o “verdadeiro” intervalo de confiança do DS no cenário n -dimensional (ver, por exemplo, LEHMANN, 2012).

5. EXEMPLO NUMÉRICO

Para mostrar na prática a determinação do intervalo de confiança e do poder do teste mínimos do DS, um exemplo numérico envolvendo uma rede de nivelamento geométrico simulada é apresentado. A rede consiste de $n = 8$ desníveis (observações), três vértices desconhecidos (B, D, e E) e dois conhecidos (A e C), conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Rede de nivelamento geométrico simulada.



Na rede numericamente simulada, foi considerado que todos os desníveis (observações) apresentam um desvio-padrão de $\sigma_1 = \pm 3$ mm, e que as cotas dos vértices A e C são fixas (injunções absolutas), e iguais a 100 m. As cotas dos vértices B e D, “isentas” de erros, são iguais a 105 m, e a cota do vértice E, “isenta” de erro, é igual a 110 m. Desta forma, foram aleatoriamente geradas as oito observações (considerando o desvio-padrão de ± 3 mm destas), e então foi

realizado o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados desta rede de nivelamento.

Com as matrizes do ajustamento, por meio da Expressão (4), foram calculados os coeficientes de correlação (ρ_{ij}) das estatísticas de teste dos oito desníveis, conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes de correlação (ρ_{ij}) entre as estatísticas de teste dos oito desníveis da rede.

Desnível	1	2	3	4	5	6	7
1							
2	0,5789						
3	-0,0526	0,0526					
4	0,0526	-0,0526	0,5789				
5	-0,1502	0,1502	-0,1502	0,1502			
6	0,4588	-0,4588	-0,1147	0,1147	-0,3273		
7	-0,1502	0,1502	-0,1502	0,1502	-0,4286	-0,3273	
8	-0,1147	0,1147	0,4588	-0,4588	-0,3273	-0,2500	-0,3273

Analisando a Tabela 2, nota-se que os coeficientes de correlação entre as estatísticas de teste das observações desta rede não são muito elevados, variando, em módulo, entre 0,05 e 0,58.

Para o cálculo do poder do teste mínimo e os limites do intervalo de confiança do DS no cenário n -dimensional, inicialmente, se calculou o valor do parâmetro de não centralidade do modelo correspondente para cada par de observações.

Para isto, o poder do teste de uma observação, no cenário bi-dimensional, foi fixado em $\gamma_{ii} = 0,80$. Desta forma, o parâmetro de não centralidade do modelo (δ_0) pode ser obtido por meio da seguinte expressão para o poder do teste de uma observação no cenário bidimensional (FÖRSTNER, 1983):

$$\gamma_{ii} = 1 - \beta_{ii} = \iint_{|w_i| > c_{\alpha/2}, |w_i| > |w_j|} \frac{1}{2\pi \sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} e^{-\frac{1}{2(1 - \rho_{ij}^2)} [(w_i - \mu_i)^2 - 2\rho_{ij}(w_i - \mu_i)(w_j - \mu_j) + (w_j - \mu_j)^2]} dw_i dw_j, \tag{11}$$

onde na Expressão (11), tal como nas expressões (6) e (7), $\mu_i = \delta_0$ e $\mu_j = \rho_{ij} \delta_0$. Ou seja, fixando o resultado da integral em $\gamma_{ii} = 0,80$, inicia-se um processo iterativo de cálculo do parâmetro de não centralidade do modelo (δ_0) até que esta igualdade seja satisfeita.

No caso, o parâmetro de não centralidade do modelo foi inicialmente arbitrado em $\delta_0 = 3,231$, e, para cada par de observações, o poder do teste foi calculado por meio da Expressão (11). Para um resultado diferente de $\gamma_{ii} = 0,8$, o parâmetro de não

centralidade do modelo era aumentado em +0,0001, e o cálculo realizado novamente, até que a diferença entre o valor calculado por meio da Expressão (10) e o valor de referência ($\gamma_{ii} = 0,8$) do poder do teste ficasse na terceira casa decimal, o que corresponde a um erro máximo de 0,1% no resultado da integral.

O valor crítico adotado nestes casos foi de $c_{\alpha_0/2} = 2,5758293$, o que corresponde a um nível de significância estipulado em $\alpha_0 = 0,01$ (teste bilateral). É importante ressaltar que foram utilizadas sete casas decimais no valor crítico ($c_{\alpha_0/2}$) visando minimizar o erro de cálculo das integrações numéricas envolvidas na Expressão 10.

Desta forma, a Tabela 3 apresenta os valores obtidos para o parâmetro de não centralidade do modelo seguindo esta abordagem, para cada par de observações considerado.

Tabela 3 – Valores para o parâmetro de não centralidade do modelo (δ_0) para cada par de desníveis considerados (cenário bi-dimensional).

Par de desníveis considerados	1	2	3	4	5	6	7
1							
2	3,5139						
3	3,4211	3,4211					
4	3,4211	3,4211	3,5139				
5	3,4211	3,4211	3,4211	3,4211			
6	3,4642	3,4642	3,4211	3,4211	3,4366		
7	3,4211	3,4211	3,4211	3,4211	3,456	3,4366	
8	3,4211	3,4211	3,4642	3,4642	3,4366	3,4277	3,4366

Analisando as Tabelas 2 e 3, nota-se que, conforme já mencionado, quanto maior o coeficiente de correlação entre as estatísticas de teste de duas observações, maior é o valor do parâmetro de não centralidade do modelo correspondente. Para o cálculo numérico destas integrais bidimensionais, foi utilizada a função “*int2d*” do *software* gratuito *Scilab* v. 5.4.1.

Com os coeficientes de correlação entre as estatísticas de teste (Tabela 2) e os valores para o parâmetro de não centralidade do modelo obtidos no caso bidimensional (Tabela 3), foi calculado o poder do teste mínimo para cada observação, por meio da Expressão (9), e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Analisando a Tabela 4, nota-se que os poderes de teste mínimos de cada observação não diferem muito entre si, o que pode ser explicado pelos coeficientes de correlação relativamente baixos entre as estatísticas de teste destas para a maior parte dos casos, além da própria geometria/configuração da rede de nivelamento simulada (Figura 2).

Por exemplo, os desníveis 1, 2, 3 e 4 envolvem um vértice desconhecido periférico e um vértice conhecido (apresentando a mesma estimativa para o poder do teste mínimo), os desníveis 6 e 8 envolvem dois vértices desconhecidos (apresentando as menores estimativas para o poder do teste mínimo), e os desníveis 5 e 7 envolvem o vértice desconhecido de maior redundância na rede (ponto central E) e um vértice conhecido, apresentando as maiores estimativas para o poder do teste mínimo.

Tabela 4 – Poder do teste mínimo de cada desnível no cenário n -dimensional.

Observação (desnível)	Poder do teste mínimo (em %)
1	76,39
2	76,39
3	76,39
4	76,39
5	76,62
6	74,80
7	76,62
8	74,80

Finalmente, por meio da Expressão (8), se calculou os limites para o intervalo de confiança do DS no cenário n -dimensional ($IC = 1 - \alpha_{00}$), resultando em:

$$0,9814 > 1 - \alpha_{00} \geq 0,9227$$

Analisando o resultado acima, nota-se que o intervalo de confiança do DS, no cenário n -dimensional, se situa entre 0,9227 e 0,9814, ou seja, valores estes menores do que o IC estipulado em $IC = 1 - \alpha_0 = 0,99$ na abordagem unidimensional.

Para verificar se de fato, os valores correspondentes para o poder do teste mínimo do DS obtidos com esta abordagem são realistas, simulações pelo método Monte Carlo foram realizadas na rede de nivelamento geométrico.

No caso, para cada observação, foram gerados e inseridos erros grosseiros (*outliers*), de magnitude entre 3σ e 9σ , sendo “ σ ” o desvio-padrão das observações, e foi aplicado o procedimento de teste DS com um nível de significância estipulado em $\alpha_0 = 1\%$, ou seja, com um valor crítico tabelado correspondente de $c_{\alpha_0/2} = 2,5758293$.

Para cada observação, 10.000 erros grosseiros foram gerados e inseridos nos experimentos, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Analisando e comparando as Tabelas 4 e 5, nota-se que de fato, para esta rede, todas as observações apresentaram um poder de teste superior ao valor mínimo estimado. Nota-se também que, para todas as observações, o poder do teste é relativamente alto, devido à geometria/configuração da rede simulada, com oito desníveis para apenas três vértices desconhecidos, ou seja, um ajustamento com

cinco graus de liberdade, e também pelos coeficientes de correlação relativamente baixos entre as estatísticas de teste das observações.

Para redes geodésicas com menor redundância, ou seja, com uma geometria mais “fraca”, e/ou cujas estatísticas de teste apresentem maior correlação, o poder do teste mínimo do DS seria menor.

Desta forma, este exemplo também ilustra a importância de se determinar o poder do teste mínimo logo na etapa de pré-análise ou planejamento da rede.

Tabela 5 – Resultados das 10.000 simulações para cada observação.

Observação	Nº de outliers detectados corretamente	Poder do teste (em %)
1	8.608	86,08
2	9.109	91,09
3	8.878	88,78
4	9.509	95,09
5	9.139	91,39
6	7.889	78,89
7	8.844	88,44
8	8.775	87,75

Neste caso, pode-se dizer que a rede de nivelamento geométrico em questão, com esta geometria/configuração, é resistente a um erro grosseiro (*outlier*). Se os valores obtidos para o poder do teste mínimos fossem muito mais baixos, a rede deveria ser “melhorada”, como por exemplo, com a inclusão de novas observações e/ou novos pontos de controle, até que os resultados obtidos fossem concordantes com valores previamente estipulados.

É importante ressaltar que os resultados obtidos na Tabela 4 são relativos aos casos em que o poder do teste de cada observação, no cenário bidimensional, é igual a $\gamma_{ii} = 0,80$, ou seja, a soma do Erro Tipo 2 e do Erro Tipo 3 é igual a $\beta_{ii} = 0,20$, pois foi este o valor de referência do resultado da integral na Expressão (10) para o cálculo dos valores do parâmetro de não centralidade do modelo correspondente apresentados na Tabela 3.

De qualquer forma, esta abordagem, mesmo “arbitrando” o poder do teste no cenário bi-dimensional, apresenta vantagens em relação à abordagem clássica apresentada em Baarda (1968), pois, no referido trabalho, desconsidera-se a ocorrência do Erro Tipo 3, e o poder do teste e as medidas de confiabilidade resultantes são baseados em valores arbitrados para uma abordagem unidimensional, ou seja, para cada observação separadamente.

Na metodologia aqui descrita, apesar dos valores arbitrados para o caso bidimensional, os resultados obtidos consideram a influência do Erro Tipo 3 e ainda são estendidos a um cenário n -dimensional, onde todas as observações são testadas (individualmente), sendo, portanto, resultados “menos otimistas” e “mais concordantes” com a realidade.

Em contrapartida, a principal desvantagem desta metodologia é o número de cálculos necessários, muito maior do que na abordagem convencional inicialmente proposta em Baarda (1968).

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma revisão teórica sobre como determinar o poder do teste mínimo e valores limites para o intervalo de confiança do procedimento DS, em um cenário n -dimensional, ou seja, considerando todas as observações envolvidas.

Para demonstrar na prática a metodologia revista, um exemplo numérico envolvendo uma rede de nivelamento geométrico simulada foi apresentado. Os resultados obtidos nos experimentos foram concordantes com os valores teóricos previamente calculados; isto mostra que a metodologia revista apresentou desempenho satisfatório na prática, apesar do grande número de cálculos necessários.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar a aplicação da metodologia revista não apenas para o DS, mas também para os testes estatísticos para a identificação de múltiplos *outliers* (simultâneos) nas observações, a aplicação da metodologia revista nas chamadas medidas de confiabilidade dos testes, e também a sua aplicação ainda na etapa de pré-análise ou planejamento de redes geodésicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Proc.n.303306/2012-2) do segundo autor e pelo projeto Universal (Proc. n. 477914/2012-8).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAARDA, W. *A testing procedure for use in geodetic networks*. Publications on Geodesy, New Series, v. 2, n. 5, Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1968.
- FÖRSTNER, W. Reliability and discernability of extended Gauss-Markov models. In: *Seminar on mathematical models to outliers and systematic errors, Deutsche Geodätische Kommission, Series A, no. 98*. Munich, Germany, pp 79–103, 1983.
- GUI, Q.; LI, X.; GONG, Y.; LI, B.; LI, G. A Bayesian unmasking method for locating multiple gross errors based on posterior probabilities of classification variables. *Journal of Geodesy*, v. 85, n. 4, p. 191–203, 2011.
- KAVOURAS, M. *On the Detection of Outliers and the Determination of Reliability in Geodetic Networks*. 1982. M.Sc.E. Thesis – Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Canada, 1982.

- GUO, J. F.; OU, J. K.; WANG, H. Quasi-accurate detection of outliers for correlated observations. *Journal of Surveying Engineering*, v. 133, n. 3, p. 129–133, 2007.
- KOCH, K. R. *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*. 2. ed. Berlin: Springer, 1999.
- LARSON, H. J. *Introduction to probability theory and statistical inference*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1974. 430p.
- LEHMANN, R. Improved critical values for extreme normalized and studentized residuals in Gauss–Markov models. *Journal of Geodesy*, v. 86, n. 12, p. 1137–1146, 2012.
- TEUNISSEN, P. J. G. *Testing theory: an introduction*. 2. ed. Delft: Ed. VSSD, 2006. 147p.
- YANG, L.; WANG, J.; KNIGHT, N.; SHEN, Y. Outlier separability analysis with a multiple alternative hypotheses test. *Journal of Geodesy*, v. 85, n. 6, p. 591–604, 2013.

(Recebido em maio de 2014. Aceito em outubro de 2014).

CORRECCIONES DIFERENCIALES VÍA NTRIP PARA DISPOSITIVO MÓVIL CON APLICACIÓN ANDROID

Differential corrections by NTRIP to mobile devices with android application

ALFONSO TIERRA
OSCAR SILVA
CÉSAR LEIVA

Grupo de Investigación Geoespacial. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE
Av. Gral Rumiñahui/n - Sangolquí, Ecuador
P.O.Box 171-5-31B
e-mail: oscarfsv@gmail.com; artierra@espe.edu.ec; leicesar@hotmail.com

RESUMEN

El posicionamiento en tiempo real usando GPS se hace mediante correcciones diferenciales enviadas desde una estación base hacia un receptor móvil. Generalmente, la corrección es enviada vía radio o por medio de satélites de comunicación. Con el desarrollo del internet inalámbrica y con el aumento de la cobertura de la señal mediante un Protocolo, conocido como IP, han hecho que se integren estas tecnologías para realizar mediciones para trabajos y estudios en tiempo real usando la tecnología GPS, y mediante el protocolo NTRIP. Esta técnica se ha estado desarrollando e implementando de forma constante en la región, siendo el presente y futuro de las mediciones para trabajos de precisión y en tiempo real. En este trabajo, se muestra la implementación de la técnica NTRIP para posicionamiento en tiempo real. El acceso a datos brutos del GPS en un móvil ANDROID y un navegador Mobile Mapper 10, la utilización de NTRIP para el envío de correcciones diferenciales por medio del protocolo IP, y el internet como red de información inmediata, fueron la base general para crear una aplicación que utiliza una corrección diferencial por posición. Los primeros resultados muestran una mejoría en la posición, pudiendo llegar a obtener un error medio de 2.3m en una Tablet con Android, y 1.6 m con el Mobile Mapper 10; en un tiempo de 5 minutos.
Palabras clave: GNSS; NTRIP; Android; Código C/A; Corrección Diferencial.

RESUMO

O posicionamento em tempo real usando GPS é feito por meio de correções diferenciais desde uma base até um receptor móvel. Geralmente, a correção é feita via rádio ou por meio de satélites de comunicação. Com o desenvolvimento da internet sem fio e o aumento da cobertura do sinal através de um protocolo conhecido como IP tem-se intensificado os trabalhos em tempo real integrando o GPS e o NTRIP. Esta técnica esta sendo desenvolvida em algumas regiões chegando ser o presente e o futuro dos trabalhos de precisão em tempo real. Neste trabalho é mostrado a implementação da técnica NTRIP para o posicionamento em tempo real. O acesso aos dados do GPS num navegador móvel com Android e no Mobile Mapper 10, o uso de NTRIP para fazer as correções diferenciais por meio do IP, e a internet como meio de comunicação, foram as bases para fazer a aplicação das correções na posição e melhorar o posicionamento do móvel. Os primeiros resultados mostram que o erro médio posicionamento do móvel depois de fazer as correções pode chegar até 2.3m em uma Tablet com Android, and 1.6m com o Mobile Mapper 10; em de 5 minutos de rastreo.

Palavras chave: GPS; NTRIP; Android; Correção Diferencial.

ABSTRACT

Real time GPS positioning is obtained by means of differential corrections sent from a base station to a mobile receiver. Usually, the correction is sent via radio or also by means of communication satellites. With the internet development and with the increase in the signal coverage thanks to a protocol, the GPS technology with NTRIP protocol are now used for studies in real-time. This technique is being developed and implemented in many regions, and it actually is the present and future of precision measurement work in real time. In this study, the implementation of the NTRIP technique for positioning in real time is described. The access to raw data from the GPS on a mobile Android and a Mobile Mapper 10, the use of NTRIP for sending differential corrections using the IP protocol, and the internet as an information network, were the mechanisms and tools used for creating a differential correction by position application. The first results show an improvement in the position determination which may achieve mean error of 2.3 m in the Tablet with Android, and 1.6m with the Mobile Mapper 10, in a time lapse of 5 minutes.

Keywords: GPS; NTRIP; Android; Differential Correction.

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de teléfonos inteligentes con la capacidad de recibir señales GPS (Global Positioning Systems) y poder navegar en cualquier parte del mundo es inmensa, trabaja con código C/A que es de libre acceso y tiene errores en metros. Por otro lado, la disponibilidad de estaciones GNSS (Global Navigation Satellite System) o Estaciones de Monitoreo Continuo-EMC, se ha convertido en la

herramienta indispensable para trabajos con precisión, además de tener la capacidad de generar correcciones diferenciales de código y fase.

Los métodos y procedimientos para el cálculo de posiciones en todo el planeta, a lo largo de la historia, han ido evolucionando con la finalidad de encontrar mejores precisiones, disminuir los errores y mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos en un procesamiento de datos GNSS.

Actualmente, existen muchos equipos que pueden utilizarse en cualquier tipo de ambiente y condiciones, hardware y software que trabajan en forma simultánea, arrojando datos de alta precisión, en la mayoría de los casos son trabajados en post-proceso para obtener un mejor resultado.

La necesidad de tener equipos de posicionamiento que respondan con datos en tiempo real, han llevado a los investigadores a desarrollar mecanismos y técnicas. Éstos, unidos con la tecnología actual de redes de información inmediata, han podido formar un conjunto de métodos, que se han ido desarrollando progresivamente, para tener información en tiempo real y con una alta confiabilidad en el posicionamiento. Los equipos GNSS o estaciones de monitoreo continuo, se han convertido en la herramienta ideal para realizar trabajos con precisión y enviar información en tiempo real, como correcciones diferenciales de código y fase.

La disponibilidad de dispositivos móviles con capacidad de recibir señales GPS y poder navegar en cualquier parte del mundo es inmensa y cada vez a menor costo. La limitante de estos dispositivos es su precisión que puede alcanzar, puesto que solo recibe la señal de código C/A que es de libre acceso y tiene errores en metros.

En el año 2002 en Alemania, el NTRIP (Network Transportation of RTCM via Internet Protocol) fue desarrollado por la BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) y consistió en transmitir correcciones diferenciales GNSS a través del protocolo de internet (TCP/ IP) originalmente en formato estándar RTCM (The Radio Technical Commission for Maritime Services), por medio del protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP), dichas correcciones son calculadas desde la estación de referencia y ofrecidas a los usuarios vía internet. (HOYER *et.al.* 2010). La ventaja del uso del NTRIP consistió en la estandarización de los formatos de los datos. Antes de esto, cada fabricante de un equipo tenía su propio estándar de formato para aplicaciones en tiempo real.

Posteriormente, en varios países se han realizado estudios relacionados con la tecnología NTRIP, como es el caso de los países que integran SIRGAS, como por ejemplo en Venezuela (MÁRQUEZ, 2007), Brasil (COSTA, *et.al.*, 2009), Argentina (PIÑON&CIMBARO, 2010), Uruguay (YELICICH, *et.al.*, 2013), Ecuador (SILVA, *et.al.*, 2013), entre otros.

El objetivo de este trabajo es realizar las correcciones diferenciales desde una EMC base, hacia un dispositivo móvil mediante la técnica NTRIP, para lo cual se utilizó una Tablet con sistema Android, capacidad de recibir el código C/A, y la programación de un interface de aplicación. También, se utilizó el receptor Mobile

Maper 10 como navegador, para recibir las correcciones diferenciales con la finalidad de comparar los resultados.

2. POSICIONAMIENTO CINEMÁTICO CONTINUO

De los diferentes métodos de posicionamiento que se pueden ejecutar con GPS, se encuentran los métodos rápidos conocidos como cinemáticos, pudiendo sus coordenadas ser determinadas ya sea en post-proceso o en tiempo real (SEEBER, 1993), (TORGE & MULLER, 2012). Es un método diferencial entre dos receptores, uno actuando como base y el otro como móvil. El móvil para mejorar su posicionamiento recibe correcciones en tiempo real desde la base. Estas correcciones pueden ser realizadas a las coordenadas o a las falsas distancias, y recibidas vía radio, satélites de comunicaciones, u otros medios o plataformas de telecomunicaciones. Actualmente, con el mejoramiento de la cobertura del Internet inalámbrica, ha hecho que se use como medio de transmisión de las correcciones vía IP (Internet Protocol) desde la base al móvil.

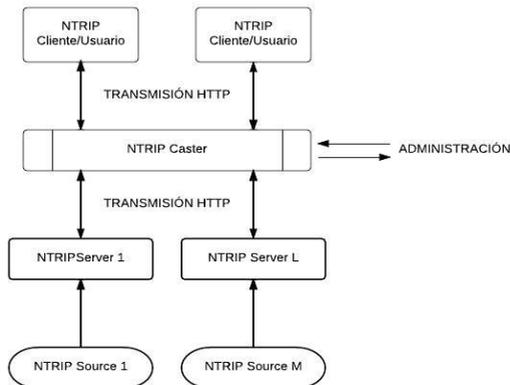
2.1 Networked Transport of RTCM Via Internet Protocol - NTRIP

Consiste en la transmisión de correcciones diferenciales GNSS (Global Navigation Satellite System, originalmente en formato estándar RTCM(Radio Technical Commission for Marine Services) (RTCM, 2001), (FERNÁNDEZ, 2008), a través del protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP - Hipertext Transfer Protocol), (NILSSON,2007), las cuales son calculadas desde una estación de referencia o base, y ofrecidas a los usuarios vía Internet.

Como se puede observar en la Figura 1. Este sistema NTRIP es constituido fundamentalmente por los siguientes componentes: NTRIPSource, NRIPServer, NTRIPCaster y NTRIPClient. (BKG, 2005).

Figura 1 - Arquitectura NTRIP.

Fuente: (MÁRQUEZ, 2007).



Basado en una transmisión estándar HTTP relativamente fácil de implementar cuando se tiene cliente y los recursos limitados de servidores de plataforma disponibles. La aplicación no se limita a un contenido particular claro o codificado, tiene la capacidad para distribuir cualquier tipo de dato GNSS. Además, tiene un potencial para apoyar el uso masivo; con difusión de cientos de señales simultáneas, de miles de usuarios posibles en la aplicación de Radio modificado, la radiodifusión en Internet del software.

El protocolo fue desarrollado para que pueda ser usado en una difusión de cientos de streams, conexiones masivas y simultaneas de usuarios, ya que el CASTERNTRIP es un equipo (computadora) de distribución de señales para difusión en internet.

2.2 Android y GPS

El uso de esta técnica, permite al usuario tener coordenadas GPS en tiempo real, sin necesidad de utilizar el post–proceso para mejorar su posición. Así mismo, la tecnología inalámbrica se ha ido implementando poco a poco en diferentes usuarios. A pesar que, el internet es público en muchos lugares por medio de la red Wi-Fi, no llega a abarcar un área extensa, llevando a desarrollar redes de comunicación para el internet de 2G, 3G y 4G. Este último con una gran velocidad de navegación tanto de descarga como de subida de información, sin embargo este servicio, para la utilización de NTRIP, tiene un costo adicional.

Los dispositivos móviles, como teléfonos celulares, tablet, smartphones han tenido un gran desarrollo tecnológico, haciéndose cada vez más accesible y de fácil uso, permitiendo el aumento de diferentes aplicaciones. Dependiendo del fabricante los dispositivos cuentan con su sistema operativo propio como por ejemplo el Windows Mobile, IOS, Android.

Android es una plataforma móvil, que incluye un sistema operativo enfocado para ser utilizado en varios dispositivos móviles como el caso de la Tablet. Este sistema operativo proporciona todas las interfaces necesarias para desarrollar nuevas aplicaciones en una forma sencilla y en un lenguaje basado en Java (Báez, et.al., 2010). La característica más importante es que se trata de una plataforma totalmente abierta, tanto para fabricantes de dispositivos móviles como para desarrolladores de aplicaciones

Generalmente, en una Tablet se dispone de un GPS integrado y con sistema Android, pudiendo acceder al servicio de navegación por satélites, el cual permite hacer geolocalización en tiempo real. En la Figura 2, se muestra su estructura interna y sus componentes.

GPS Chip. Es un receptor de radio frecuencia que se comunica con los satélites.

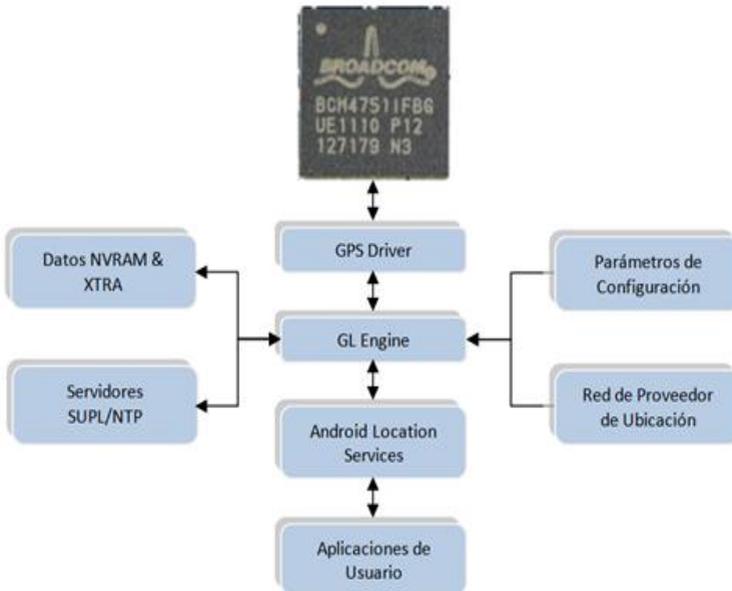
GPS Driver. Usa API (Application Programming Interface) de bajo nivel para que haya una comunicación con el chip GPS.

GL Engine. Recoge la información de localización de las torres móviles y lee el NVRAM (Chip que guarda la información o contenido cuando la batería esta

baja, compuesto de una combinación de chips SRAM y EEPROM.). Capta múltiples satélites visibles, asiste al GPS Driver, fija la posición con información adicional transmitida desde satélites o accede vía internet a los servidores de red SUPL/NTP y de ser necesario, guarda la información en NVRAM para un uso posterior, inicializando el GPS con datos ya registrados.

Figura 2 - Estructura del GPS en Android.

Fuente: (LATORRE, 2012).

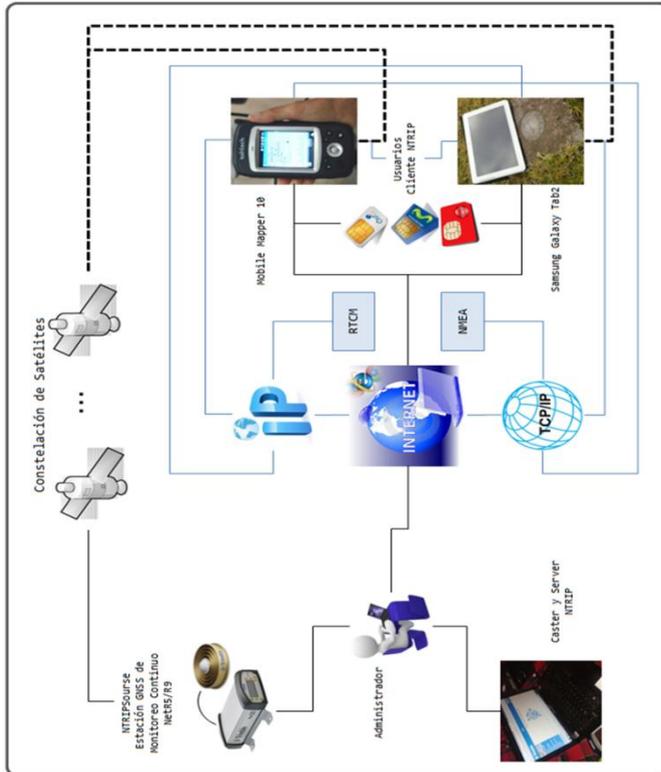


3. METODOLOGÍA

Para la aplicación de la técnica NTRIP, se utilizó como receptor base, la estación GNSS de monitoreo continuo Trimble NetR5. Esta generó información de sentencias NMEA (latitud, longitud, altura elipsoidal, hora UTC) (SIRF, 2005) y correcciones de código mediante mensajes RTCM, con un intervalo de un segundo, que fueron enviadas al receptor móvil vía IP. Como móvil se usó el receptor Mobile Mapper10; y una Tablet Samsung Galaxy Tab2 con chip GPS y con Android 4.0.3, que genera información de navegación a partir de sentencias NMEA, que pueden ser descargadas en tiempo real desde una interfaz de programación para Android.

Para realizar la corrección diferencial por posición al móvil, se consideró: la distancia de la base al móvil, que exista cobertura de telefonía celular, y que sean los mismos satélites rastreados tanto en la base como en el móvil. La Figura 3, muestra la arquitectura general utilizada para la aplicación de la técnica NTRIP.

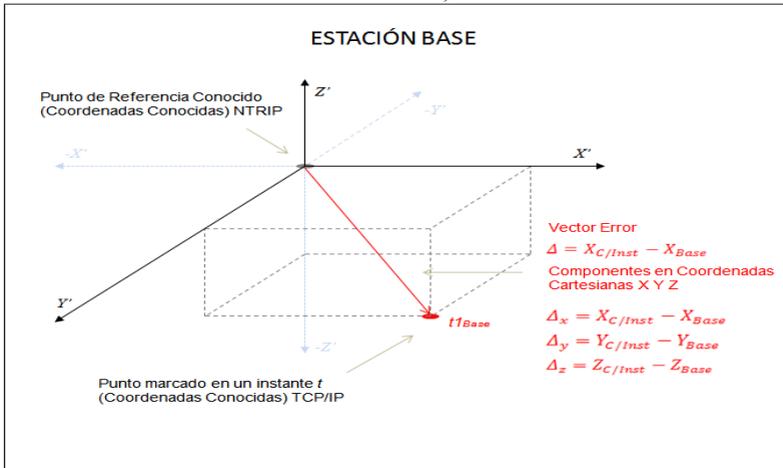
Figura 3 - Arquitectura General de la Aplicación.



Los equipos móviles tienen limitaciones para poder corregir a partir de las falsas distancias (Pseudoranges), por lo que se procedió a utilizar una Corrección Diferencial por Posición enviada del receptor base, hacia el móvil para mejorar su posición. Esta técnica consiste en calcular las coordenadas de cada posición en el receptor base, y es comparada con las coordenadas conocidas de la misma estación, generando así componentes de corrección en X, Y, Z. En los mismos instantes de tiempo se determina las coordenadas en el móvil con la finalidad de que tengan los mismos satélites rastreados, y poder recibir las correcciones desde la base (DALDA et al., 2008).

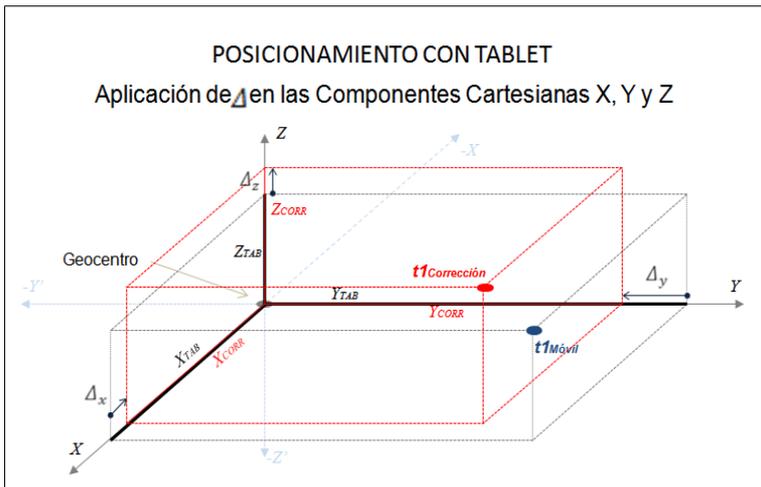
Las coordenadas cartesianas de precisión del punto de referencia, son el punto de partida para el cálculo de la corrección, pues las coordenadas marcadas cada instante junto con las coordenadas reales del equipo, no serán las mismas, permitiendo establecer una diferencia de posición en las tres componentes (Ver Figura 4).

Figura 4 - Punto GPS marcado en un instante t en la Estación Base (Dato NMEA).



Estas diferencias (Δ_x , Δ_y , Δ_z) deben ser enviadas al móvil (Tablet), para que corrija su posición actual (X_{TAB} , Y_{TAB} , Z_{TAB}) y obtenga su posición corregida (X_{CORR} , Y_{CORR} , Z_{CORR}) (Ver Figura 5).

Figura 5 - Corrección aplicada al punto original de la Tablet.



Para obtener las correcciones diferenciales desde la base, y corregirlas en la Tablet en tiempo real fueron desarrollados Interfaces de Programación para

Android (API, por sus siglas en inglés). Los APIs fundamentales desarrollados para la aplicación NTRIP son indicados a continuación:

- API de ubicación, para tener acceso inmediato al servicio de localización (LocationManager), y activar a los diferentes proveedores de localización (LocationProvider), en este caso, se activó solo el que capta la señal GPS. En el Cuadro 1, se puede observar su código.

Cuadro 1 - Código Fuente de Ubicación.

```

LocationManager service = (LocationManager)
getSystemService(LOCATION_SERVICE);
boolean enabled = service
.isProviderEnabled(LocationManager.GPS_PROVIDER);

if (!enabled) {
    Intent intent = new
Intent(Settings.ACTION_LOCATION_SOURCE_SETTINGS);
    startActivity(intent);
    ...
}
MainActivity

```

API de Conexiones Inalámbricas, para descargar información desde la estación GNSS de monitoreo continuo, la aplicación debe tener un acceso a internet del tipo 3G o HSPA. El Cuadro 2, se muestra su código.

Cuadro 2 - Código Fuente de Conexiones Inalámbricas.

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<manifest
xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
    package="com.especdp.ntripclient"
    android:versionCode="20130325"
    android:versionName="2013.03.25"
    android:installLocation="auto">
    <uses-permission
android:name="android.permission.INTERNET" />
    <uses-permission
android:name="android.permission.ACCESS_NETWORK" />
    ...
</application>
...
</manifest>

```

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizaron las pruebas respectivas tanto en una Tablet como en Mobile Mapper. La técnica NTRIP se realizó en 8 puntos, en las cuales se conocían las coordenadas respectivas, y que se utilizaron como coordenadas de control, para evaluar el error de posicionamiento del móvil que puede alcanzar después de recibir la corrección diferencial. Las distancias entre la base y el móvil alcanzaron hasta 30 km aproximadamente. Se realizó un rastreo continuo a cada segundo de intervalo de grabación, y en ese mismo tiempo se recibía las correcciones diferenciales desde el NTRIPCASTER.

Las coordenadas finales del móvil fueron transformadas a un sistema local, y se calcularon las coordenadas planas Este y Norte (E,N) con la finalidad de determinar la distancia. Se consideró solamente la posición horizontal porque que en vertical los errores son mayores, más aún cuando estamos utilizando la señal de código C/A. Fueron calculadas las diferencias en distancia comparadas con las obtenidas en los puntos de prueba (control). Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 1 para la Tablet, y en la tabla 2 para el Mobile Mapper.

Tabla 1 - Resultados con la TABLET.

Puntos de Control	Distancia (Km)	Diferencias		
		NORTE (m)	ESTE (m)	ERROR EN DISTANCIA (m)
CANCHA ESPE	0,28	1,835	-3.332	3,804
CIE04	0,47	-2,403	0,002	2,403
SANTA ROSA	2,40	0,981	1,647	1,917
MIRAVALLE	8,50	-1,623	2,513	2,991
VICENTINA	11,86	-0,893	-0,172	0,909
H. DEL SUR	13,10	0,750	-1,179	1,397
PE-18483-Y	16,00	-0,843	2,520	2,657
PE-16943-Y	31,10	-0,270	2,091	2,109
Media Aritmética				2,273
Desviación Estándar				0,910

En la Tabla 1, en la última columna se muestra el error en la distancia horizontal obtenida en la Tablet, mediante la comparación con las distancias obtenidas en los puntos de control a partir de las coordenadas Este y Norte. Los resultados muestran que se puede llegar a tener errores en posicionamiento como media de 2.3 m aproximadamente. Mientras que en la tabla2, se muestra los

resultados obtenido con el Mobile Mapper, y puede alcanzar errores medios de 1.6 m aproximadamente.

Tabla 2 - Resultados con el Mobile Mapper.

Puntos de Control	Distancia (Km)	Diferencias		
		NORTE (m)	ESTE (m)	DISTANCIA (m)
CANCHA ESPE	0,28	0,462	0,145	0,484
CIE04	0,47	-0,739	-0,110	0,747
SANTA ROSA	2,40	-1,258	-1,090	1,665
MIRAVALLE	8,50	-2,192	2,291	3,171
VICENTINA	11,86	-1,278	0,884	1,554
H. DEL SUR	13,10	1,096	0,183	1,111
PE-18483-Y	16,00	0,805	2,055	2,207
PE-16943-Y	31,10	0,065	1,713	1,715
Media Aritmética				1,582
Desviación Estándar				0,850

5. CONCLUSIONES

- La corrección diferencial (DGPS en tiempo real) que se utilizó en el presente estudio, por posición, tienen las limitantes de distancia, pues a medida que el móvil se aleja de la base, los errores que afectan a las observaciones del receptor móvil difieren de los errores que afectan a las observaciones de la estación base. Los mejores resultados se obtuvieron en un radio de hasta 30 km con base en la estación GNSS.
- Para que el método de corrección diferencial por posición sea aplicado de la mejor forma, se debe utilizar únicamente la navegación por satélites GPS, dado que los dispositivos móviles tienen varias opciones para calcular la posición, como son las redes y antenas de telefonía celular y la otra por medio de GOOGLE Maps que triangula las coordenadas por medio del internet. Si estas tres opciones están activadas, se produce una respuesta mucho más rápida pero una solución de posición con un mayor error pudiendo llegar a 30 m, pero si solo se activa para recibir la señal de los satélites del GPS baja a 5m.

- En un dispositivo móvil activando solo la señal GPS y recibiendo la corrección diferencial vía IP, desde una estación de monitoreo continuo y hasta una distancia de 30 km, se puede obtener errores en la posición horizontal de 2.6m con la Tablet y 1.6m con el Mobile Mapper 10.

AGRADECIMIENTOS:

Expresamos nuestro agradecimiento a CEDIA (Consortio Ecuatoriano para el Desarrollo de Internet Avanzado) quién apoyo con el financiamiento para la ejecución de este proyecto. Así como, a los integrantes de la ESPOCH y de la UTN por su colaboración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÁEZ, M., BORREGO, A., CORDERO, J., CRUZ, L., GONZÁLEZ, M., HERNÁNDEZ, F., ZAPATA, A. Introducción al Android. Tecnología UCM. 2010. www.tecnologíaUCM.es, ingresado en 30 de agosto de 2013.
- BKG. *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol, 2005*. Ingresado en 15 de noviembre de 2013. <http://igs.bkg.bund.de/ntrip>.
- COSTA, S., LIMA, M., DE MOURA, N., ABREU, M., DA SILVA, A., FORTES, L., MOREIRA, A. *RBMC in Real Time Via NTRIP and its Benefits in RTK and DGPS Surveys*. Reunión SIRGAS. Buenos Aires, Noviembre 2009 en www.sirgas.org. Ingresado en 20 de noviembre de 2013.
- DALDA, A., GONZÁLEZ, F., CANO, M., SÁNCHEZ, J., & PÉREZ, M. *Curso Avanzado de Posicionamiento por Satélite*. Instituto Geográfico nacional Ministerio de Fomento. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. 2008.
- FERNÁNDEZ, A. *Diseño e Implementación de un Generador y un Servidor de Correcciones de GPS Diferencial en Formato RTCM sobre TCP/IP, Mediante una Arquitectura Distribuida*. Madrid – España. 2008
- FETECUA, H. *Implementación de la Red en Panamá GEO-UTP EN Tiempo Real Vía NTRIP*. Reunión SIRGAS. Ciudad de Panamá, Octubre 2013 en www.sirgas.org. Ingresado en 18 de marzo de 2014.
- HOYER, M., PÉREZ, R., DA COSTA, S., CIOSE, V., CIMBARO, S., NOGUERRA, G., REZZA, R. *Avances en la Materealización del Marco de Referencia SIRGAS en Tiempo Real Mediante NTRIP*. Reunión SIRGAS. Lima, Noviembre 2010 en www.sirgas.org. Ingresado en 15 de noviembre de 2013.
- LATORRE, A. *Como está estructurado el GPS en Android*. 2012. Ingresado en 5 de octubre de 2013. <http://www.elandroidlibre.com>
- MÁRQUEZ, A. *NTRIP Herramienta Indispensable para la Cartografía y el Catastro*. II Jornadas Nacionales de Geomática. MECINCA. Caracas-Venezuela, 2007.
- NILSSON, H. *Trends in Functional Programming*. Nottingham.2007.

- PIÑON, D., CIMBARO, S. *Envío de Correcciones Diferenciales en Tiempo Real a través de Internet*. Reunión SIRGAS. Lima, Noviembre 2010 en www.sirgas.org. Ingresado en 10 de noviembre de 2013.
- RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR MARINE SERVICES -RTCM. *RTCM Recommended Standard for Differential GNSS (Global Navigation Satellite System) Service Version 2.3*. Radio Technical Commission for Maritime Services. Virginia: RTCM. 2001.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Walter de Gruyter. New York, 1993.
- SILVA, O., Leiva, C., Tierra, A. *Implementación de Correcciones Diferenciales en Tiempo Real en Dispositivos Móviles Android con El Uso de NTRIP*. Reunión SIRGAS. Ciudad de Panamá, Octubre 2013 en www.sirgas.org.
- SIRF. *National Marine Electronics Association: NMEA Reference Manual*. USA. 2005
- TORGE, W; MULLER, J. *Geodesy*. De Gruyter. 4 Edition, 2012.
- YELICICH, R., CAMISAY, M., STRIEWE, E., PÉREZ, R., MACKERN, M. *Análisis del Posicionamiento GNSS a Partir de Soluciones de Red (FKP, VRS) obtenidas por NTRIP-RTK en Uruguay*. Reunión SIRGAS. Ciudad de Panamá, Octubre 2013 en www.sirgas.org. Ingresado en 20 enero de 2014.

(Recebido em setembro de 2014. Aceito em novembro de 2014).

O PROBLEMA DA QUALIDADE DE DADOS ESPACIAIS NA ERA DAS INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS VOLUNTÁRIAS

The Geospatial Data Quality subject in the Volunteered Geographic Information era

JOÃO VITOR MEZA BRAVO
CLAUDIA ROBBI SLUTER

Universidade Federal do Paraná – UFPR
Setor de Ciências da Terra – Departamento de Geomática
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Caixa Postal 19001, 8131 – 990, Curitiba, Paraná, Brasil
jvbravo@gmail.com; robby@ufpr.br

RESUMO

Nas últimas décadas, a produção da geoinformação sofreu mudanças devido à difusão das tecnologias computacionais e da Internet. Essas tecnologias permitiram a disseminação das informações geoespaciais, bem como fizeram com que muitos indivíduos fossem conduzidos a uma nova perspectiva de uso e produção de mapas. Nesse sentido, o presente estudo foi desenvolvido na intenção de fornecer suporte de conhecimento para os pesquisadores engajados no entendimento das novas tendências na produção da geoinformação, bem como àqueles que propõem-se a compreender os problemas relacionados à qualidade de dados espaciais no contexto dos usuários produtores da geoinformação. Para alcançar tal objetivo, pode-se dizer que, num primeiro momento, fez-se uma breve revisão historiográfica na qual apresenta-se os conceitos que permitiram o surgimento dos sistemas de informações geográficas voluntárias. A partir desta contextualização, buscou-se relacionar esta temática ao problema da avaliação da qualidade da informação espacial, o qual tem travado, por exemplo, a utilização das informações geográficas voluntárias em órgãos oficiais de mapeamento. Indicou-se que isso ocorre pois os modelos de avaliação utilizados não contemplam as necessidades dos sistemas de informações geográficas voluntárias e, além disso, ressaltou-se a importância do envolvimento da comunidade científica na solução de tais impasses para que seja viabilizado o acesso

de um maior número de indivíduos às informações espaciais atualizadas e de qualidade assegurada.

Palavras-chave: VGI; Qualidade de Dados Espaciais; Historiografia e Conceitos.

ABSTRACT

Throughout the last few decades, the geoinformation production has changed due to the widespread of computer and internet technologies. These technologies allowed the dissemination of geospatial information as well as brought many individuals closer to the usage and production of maps. For this reason, we have designed this paper in order to provide knowledge support for those researchers, which are concerned about understanding the new trends in geoinformation production and spatial data quality issues as well. At first, we discussed few concepts that explain the emergence of the VGI systems, as they currently appear on the internet, through a small historiographical revision. Then, we connected the VGI theme with Spatial Data Quality issues due to the interest of official agencies in the use of the volunteered information for updating their datasets. Actually, we pointed that official agencies are not using VGI because the way we use to assess the Geospatial Data Quality is not fulfilling the needs of a scenario drawn by these systems. Additionally, we have highlighted the importance of the scientific community engagement, by solving troubles concerning VGI quality assessment. That will allow the growth of individuals' amount accessing a qualified and updated geospatial information.

Keywords: VGI; Geospatial Data Quality; Historiography and Concepts.

1. INTRODUÇÃO

A Cartografia encontra-se, face à uma nova perspectiva devido ao desenvolvimento da tecnologia computacional: a informação espacial pode ser produzida e apresentada por qualquer indivíduo que tenha acesso a um computador e à Internet (GRIFFIN & FABRIKANT, 2012; SLOCUM et al, 2009). Nesse sentido, é notável a existência de sistemas que permitem que usuários comuns, sem contato prévio com qualquer tipo de técnica na produção ou manuseio de dados espaciais, construam representações do espaço geográfico. Esses sistemas são os denominados Sistemas *VGI* (*Volunteered Geographic Information*) ou Sistemas de Informação Geográfica Voluntária (GOODCHILD, 2007) e têm revolucionado a maneira de se entender a Cartografia, mesmo em órgãos oficiais de mapeamento (BEARDEN, 2007; HAKLAY et al, 2008; ANAND et al, 2010; JOHNSON & SIEBER, 2012).

Nesse contexto de transformações (CASTELLS, 2003), a qualidade dos dados geográficos é um dos assuntos que têm figurado em muitas das discussões acadêmicas. Por conta da recente inserção de usuários sem conhecimento em Cartografia na produção da informação espacial, tem-se estudado as mudanças trazidas por este paradigma à análise da qualidade dos dados espaciais. Tema de

pesquisa da Associação Cartográfica Internacional (GUPTILL & MORRISON, 1997), a qualidade atribuída às informações espaciais é, também, objeto de investigação daqueles que procuram compreender as possibilidades de utilização das informações geográficas voluntárias em mapeamentos oficiais (HAKLAY et al, 2008; FLANAGIN & METZGER, 2008; MUMMIDI & KRUMM, 2008). Tamaña importância tem sido dada a essa problemática que, organizações como a ISO (*International Organization for Standardization*), desenvolvem e estudam normas específicas para a adequação das avaliações da qualidade dos dados geográficos ao contexto da era dos “usuários produtores”, ou, “*producers*” (BUDHATHOKI et al, 2008).

Assim sendo, o presente estudo foi concebido com a intenção de apresentar a evolução dos conceitos que permitiram a criação dos sistemas de informações geográficas voluntárias e, também, de se compreender o conceito de qualidade de dados geográficos segundo a pujança da era dos usuários produtores de conteúdo. Para tanto, num primeiro momento, faz-se uma revisão cronológica das proposições que fundamentaram os primeiros passos para a transição do mapeamento analógico para o digital e, também, de um mapeamento digital assistido por profissionais para a produção e disseminação da informação espacial por usuários. Além disso, apresenta-se os sistemas VGI como conceito, assim como as tecnologias que os permeiam e dão suporte ao seu desenvolvimento. Num segundo momento, busca-se compreender o conceito de qualidade de dados espaciais à luz da dinâmica dos “usuários produtores” na atualização de bases de dados geográficos.

2. DA OBJETIVIDADE DE ROBINSON AOS SISTEMAS VGI

A funcionalidade dos mapas, defendida por Arthur Robinson, destacou-se no cenário acadêmico na publicação de sua obra *The Look of Maps* (ROBINSON, 1952): a cartografia evoluía, então, ao status de ciência, amparada pela objetividade por ele advogada (MONTELLO, 2002; KITCHIN & DODGE, 2007). É sabido que os estudos desenvolvidos nessa época limitavam-se à utilização de mapas em papel, pois o mapeamento assistido por computadores emergiria apenas alguns anos mais tarde (SLOCUM et al, 2009).

No final dos anos 1960 e início da década de 1970, a maneira de se produzir mapas começa a ganhar um novo rumo com o surgimento de sistemas computacionais primitivos, desenvolvidos na intenção de se trabalhar com dados espaciais (BURROUGH, 1986; TAYLOR, 1973; COPPOCK & RHIND, 1991). Esboçavam-se, assim, interessantes aplicações na intersecção dos campos do conhecimento da Cartografia e Computação, como sistemas para avaliação de recursos naturais e planejamento territorial (BURROUGH, 1986).

Ainda naquela época, trabalhar com dados espaciais não era uma tarefa fácil, principalmente no que se refere à delimitação de regiões de interesse por meio de técnicas dependentes de mapas em papel: recuperar os limites antes delimitados de maneira analógica, segundo a utilização de mesas de luz, era uma tarefa demasiadamente onerosa e, muitas vezes, impraticável (BURROUGH, 1986). Na

tentativa de solucionar esse problema, urbanistas norte-americanos notaram que era possível combinar informações advindas de mais de um mapa por meio da sobreposição destes, em uma mesa de luz. Howard Fisher desenvolveu um sistema computacional que tinha algumas funções análogas a essa solução, o SYMAP, pontuando um dos primeiros passos para o desenvolvimento dos SIGs (BURROUGH, 1986). Os esforços de Fisher, em Harvard, mostraram à comunidade envolvida na interpretação e produção de informações espaciais, que com um pouco mais de empenho era possível que fossem implementadas funções que permitissem análises sofisticadas dos dados, como aquelas destinadas ao planejamento e estudos ambientais (BURROUGH, 1986; COPPOCK & RHIND, 1991). Dessa maneira, na década de 1970, os investimentos governamentais para o desenvolvimento de sistemas computacionais direcionados ao auxílio de tarefas relacionadas à produção e à análise de dados espaciais aconteceram, principalmente, na América do Norte e na Europa (FAIRBAIN, 1994; BURROUGH, 1986).

Entretanto, deve-se fazer uma ressalva quanto às definições empregadas para alguns termos que surgiram na cronologia deste compêndio, pois nem todos os esforços feitos na intenção de se trabalhar com dados espaciais em computadores culminaram na produção de sistemas como hoje se compreende o conceito de Sistemas de Informação Geográfica. Apenas alguns sistemas que tinham como foco a automação das análises espaciais, é que foram os responsáveis pelo surgimento de tal tecnologia. Paralelamente, o desenvolvimento de sistemas que tinham como propósito a automação da produção de mapas, deram origem ao que se denominou de CAC - *Computer-assisted Cartography* (COWEN, 1988).

Na década de 1980, as duas tecnologias, SIGs e CACs, começaram a convergir, mas isso fora apontado por Taylor (1973), quase uma década antes. Nesse mesmo momento histórico, havia o desenvolvimento de uma interessante área da computação: a computação gráfica. Muito se deve às necessidades dos cartógrafos o crescimento dessa área, a qual recebeu aporte financeiro dos governos que se preocupavam em melhorar a qualidade das representações computacionais do seu espaço geográfico, com a finalidade de aprimorar aspectos relacionados à segurança nacional (CLOUD, 2002). Nessa mesma época, surgiram os sistemas CAD - *Computer-aided Design* - que revolucionaram a forma de se construir representações em grande escala no meio digital. Contudo, esses sistemas não possuíam funções de análise espacial, o que limitava sua utilização aos profissionais que objetivavam produzir mapas sem utilizar esta funcionalidade. O aparecimento dessas tecnologias, aliado ao barateamento de computadores suficientemente potentes, desencadearam a evolução da produção de dados espaciais que se viu nos anos subsequentes (BOURROUGH, 1986; TOMLINSON & PETCHENIK, 1988; COPPOCK & RHIND, 1991; FAIRBAIN, 1994).

Na década de 1990 a utilização de produtos ligados à tecnologia computacional tornou-se soberana (PETERSON, 1997; KÖBBEN & KRAAK, 1999). Juntamente com o crescimento da utilização dos computadores pessoais e do desenvolvimento de redes, como a Internet, na Cartografia passou-se a utilizar esses

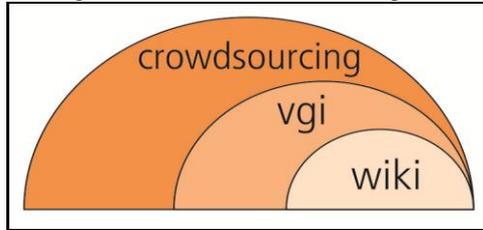
equipamentos como principal plataforma de apresentação dos dados geográficos (FAIRBAIN, 1994; PETERSON, 1997; KÖBBEN & KRAAK, 1999; PETERSON, 2001, CASTELLS, 2003). Para Peterson (1997) a Internet se tornaria, em alguns anos, “a maior forma de distribuição (apresentação) de mapas”. Entretanto, as características da Internet ainda eram pouco dinâmicas no momento em que Peterson postulou essa afirmação. Era a chamada WEB 1.0, intransigente quanto à participação de usuários na produção da informação (O'REILLY, 2007). No mesmo viés, Cormode & Krishnamurthy (2008) chamam de “velha WEB” os sistemas da WEB 1.0 e definem que, à luz desse conceito, a maioria dos usuários atuavam, simplesmente, como consumidores do conteúdo, o que legitima a afirmação de O'Reilly (2007).

No início da década de 2000 surgiu um novo conceito: a WEB 2.0 (O'REILLY, 2007; CORMODE & KRISHNAMURTHY, 2008). Para Cormode & Krishnamurthy (2008), os sistemas concebidos sob o conceito da WEB 2.0 permitem que o usuário participe da criação e disseminação do conteúdo. Esses sistemas também consentem a interligação de toda a estrutura WEB, agora vista como uma plataforma (O'REILLY, 2007). Nesse sentido, se Peterson (1997) já defendia a Internet como grande disseminadora do conteúdo geográfico, mesmo nos moldes da WEB 1.0, Goodchild (2007) ratificou os sistemas WEB como grandes plataformas do crescimento da utilização dos produtos cartográficos, à luz do conceito de WEB 2.0. Os Sistemas WEB para a disseminação do conteúdo geográfico que melhor se adequam a esse perfil conceitual são os chamados sistemas VGI (GOODCHILD, 2007; HAKLAY et al, 2008; HEIPKE, 2010; HAKLAY, 2010; LIU & PALEN, 2010).

2.1 Sistemas de Informação Geográfica Voluntária: Conceitos e Qualidade na era dos “Producers”

Os sistemas VGI têm como sustentação a criação e disseminação de informações geográficas por meio de voluntariado, ou seja, um tipo de “crowdsourcing” dos mapas que abrange os movimentos “wiki” (Figura 1). Para explicar a dinâmica do conceito, Goodchild (2007) utilizou a expressão “cidadãos como sensores” exprimindo que, no contexto atual de disseminação do conhecimento por meio da Internet e do uso de dispositivos móveis, todas as pessoas podem compartilhar informações espaciais em qualquer lugar, a qualquer momento. Exemplos de sistemas VGI podem ser observados na literatura, sendo os mais recorrentes o Wikimapia®, o Openstreetmap (OSM) e o Google Map Maker®. São estes, da mesma maneira, os mais divulgados e utilizados pela comunidade usuária deste segmento (GOODCHILD, 2007, HAKLAY, 2010a; PARKER, 2012).

Figura 1 - Posição do segmento VGI na cadeia hierárquica dos movimentos web.



O conceito presente nos sistemas de informação geográfica voluntária inova o modo de se descrever o espaço geográfico: as *geotags* e os comentários são indicativos importantes do sentimento produzido por um determinado local em pessoas que ali vivem ou que, simplesmente, por ali passaram (OXLEY, 2009; MUMMIDI & KRUMM, 2008; GOODCHILD, 2007). Por exemplo, as toponímias, como forma de descrição do espaço geográfico, deixaram de ser o único subsídio textual para a aquisição do conhecimento espacial (DICK, 1990; TUAN, 1975; MUMMIDI & KRUMM, 2008, BRAVO et al, 2011). Isso significa que essa nova plataforma permite que os usuários insiram conteúdo tal qual achem pertinente (GOODCHILD, 2007), prática a qual estava reservada à descrição dos profissionais que atuavam profissionalmente nas atividades de mapeamento.

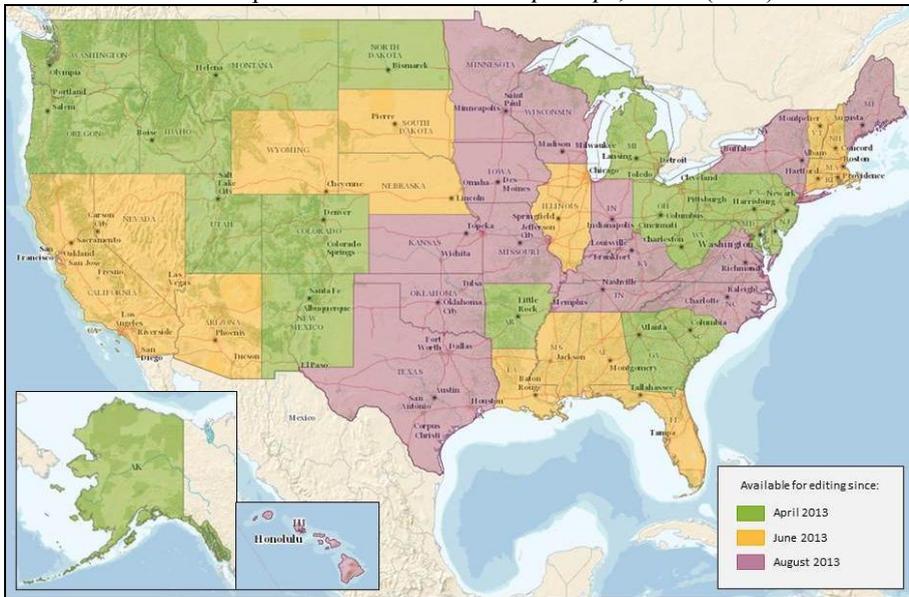
Nesse sentido, nos sistemas VGI os usuários são responsáveis pelo desenvolvimento do conteúdo, organização e manutenção dos dados (PRIEDHORSKY & TERVEEN, 2008), têm um importante papel na disseminação do conteúdo geográfico e atuam como mediadores na difusão do uso dos produtos cartográficos (O'REILLY, 2007; CORMODE E KRISHNAMURTHY, 2008; OXLEY, 2009; GOODCHILD, 2007; HAKLAY et al, 2008, HAKLAY, 2010; GRIFFIN & FABRIKANT, 2012). Reflexo da sua importância foi a criação de uma linha de pesquisa para o desenvolvimento e uso dessa tecnologia, numa das mais importantes agências de geoinformação do mundo, o *Ordnance Survey* - UK (ANAND et al, 2010; ORDNANCE SURVEY, 2013), com a intenção de fomentar pesquisas que propõem compreender as mudanças causadas pela inserção de usuários na construção de bases cartográficas digitais e, também, os aspectos relativos à qualidade atribuída às informações disponibilizadas por voluntários (ANAND et al, 2010; PARKER, 2012; HAKLAY, 2010; ORDNANCE SURVEY, 2013). Semelhantemente, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (United States Geological Survey – USGS), responsável pela produção do mapeamento oficial norte-americano, tem investido na utilização das informações geográficas voluntárias para a atualização de suas bases, por intermédio do projeto “The National Map Corps” (USGS, 2013; BEARDEN, 2007).

A Figura 2 ilustra a iniciativa estadunidense, na qual demonstra-se a época em que se tornou possível utilizar as informações geográficas voluntárias para a atualização das bases oficiais em cada um dos Estados norte-americanos.

Nesse sentido, Anand et al (2010), assim como Haklay (2010) e Mummidi & Krumm (2008), buscaram esclarecimento acerca da qualidade das informações geográficas voluntárias em exemplos de sistemas VGI por eles selecionados, na intenção de avaliar a possibilidade da atualização das bases oficiais. Essa demanda se dá por conta da riqueza de conteúdo que só pessoas com o conhecimento de uma determinada região geográfica, podem observar, representar e indicar (GOODCHILD, 2007; LEEUW et al, 2011). Pensando no potencial dos sistemas VGI para esse propósito, Haklay et al (2010) mostraram-se impressionados com “a velocidade com que um conjunto de dados foi coletado”, referindo-se à colaboração de um grupo de 150 pessoas na cobertura dos arruamentos de uma porção do território inglês. Isso demonstrou, para eles, que os sistemas VGI têm, claramente, muito a contribuir com a atualização das bases oficiais.

Figura 2 - Data de permissão do uso de VGI para a atualização das bases oficiais nos Estados norte-americanos.

Fonte: Adaptado de *The National Map Corps, USGS* (2013).



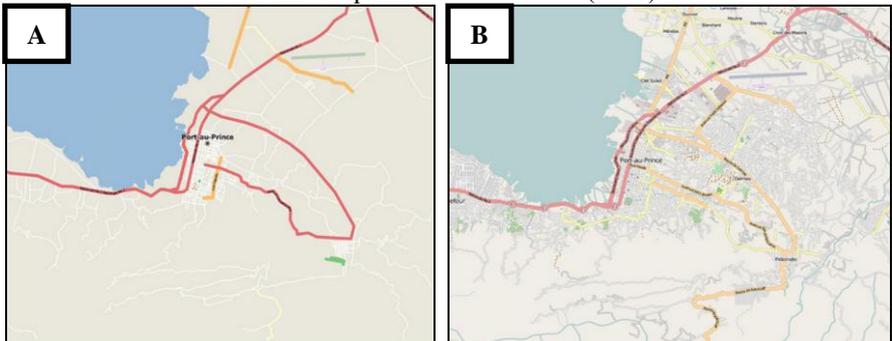
Nessa mesma linha, Haklay (2010) pesquisa outra importante variável: a qualidade posicional das informações geográficas voluntárias. Ele, ao comparar dados provenientes do OpenStreetMap com outros, advindos da base cartográfica do Ordnance Survey, percebeu que as pessoas conseguem, com pouco conhecimento sobre Cartografia, construir representações relativamente acuradas: quando mais acurados, os dados estão a menos de 2 metros da posição real; quando menos

acurados, têm em torno de 20 metros de diferença para a base oficial. Esses dados são extraídos de fontes diversas e Heipke (2010) aponta algumas das mais importantes: os sistemas de posicionamento acoplados aos dispositivos móveis e, as ortofotos e imagens. São produtos ou tecnologias aos quais as pessoas têm acesso diariamente, mesmo que de forma indireta. Dessas duas fontes emanam grande parte das informações voluntárias, tendo como estímulo as motivações dos usuários em disseminar seu conhecimento geográfico (COLEMAN et al, 2009).

Coleman et al (2009) pesquisaram a motivação dos usuários VGI quando estes disponibilizam suas próprias informações nos sistemas WEB. Tais autores determinaram uma diversidade interessante de causas como, por exemplo, o altruísmo e o favorecimento pessoal. Por outro lado Coleman et al (2009) revelaram que, dada a dimensão e a complexidade do alcance dos sistemas VGI, é difícil que sejam classificadas todas as intenções dos usuários deles participantes. Entretanto, dessas motivações é que surge, por exemplo, o que Zook et al (2010) descreveram, conforme ilustrado na Figura 3. Após o terremoto de janeiro de 2010, que devastou o Haiti, havia a necessidade de serem respondidas apenas duas perguntas: quem precisava de ajuda e em qual lugar? (ZOOK et al, 2010). O OpenStreetMap mostrou-se uma eficiente (GARLANDINI & FABRIKANT, 2009) ferramenta ao possibilitar o salvamento dos flagelados, uma vez que, voluntários utilizaram imagens de alta resolução, disponibilizadas pela Google e pela Bing, para descrever possíveis caminhos na base do sistema; estes caminhos, por sua vez, foram utilizados pelas equipes de busca, quando precisava-se obter informações acerca das áreas devastadas e rotas mais rápidas para o acesso.

Figura 3 – Base do OSM na região do terremoto antes (A) e após (B) o incidente.

Fonte: Adaptado de ZOOK *et al* (2010).



Todavia, não só motivações altruístas são destacadas nos exemplos dados na literatura. Surgem, também, problemas como os estudados por Haklay (2010b; 2013), que notou que, ao contrário do afirmado por Goodchild (2007), nos sistemas VGI existe um tipo de segregação, na qual porções e/ou feições do espaço geográfico tornam-se mais importantes do que outras. Ele exemplifica que na

Inglaterra as áreas rurais ou “periféricas” são menos detalhadas do que importantes aglomerados urbanos (HAKLAY et al, 2010), fato este que pode estar ligado ao que Leeuw et al (2011) encontraram. Em seus estudos, estes autores concluíram que pessoas com conhecimento do local classificam as informações mais acuradamente do que pessoas sem esse conhecimento; logo, quanto maior o número de indivíduos vivendo numa determinada localidade, maior e, talvez, melhor, será o número de informações a ela relacionado (LEEUEW et al, 2011; FLANAGIN & METZGER, 2008). Isso é ocasionado pelo interesse natural que têm as pessoas em descrever o espaço por elas conhecido, afirmação exposta por Tuan (1975), o que também pode justificar a segregação apontada por Haklay et al (2010; 2013). Castells (2003) faz importantes apontamentos no que se refere à “geografia da internet” e indica que há sim uma maior concentração de usuários, servidores e demanda em determinadas porções do espaço geográfico (DRAHOS, 1995). Isso pode ocasionar, bem como, justificar tal segregação, o que abre possibilidades para que se estude melhor esse tema.

Em suma, num olhar mais abrangente, para Haklay (2010) e Johnson & Sieber (2012), existe um grande potencial de uso dos sistemas VGI no contexto do mapeamento oficial. Contudo, eles indicam que muitos problemas devem ser estudados para que as informações contidas nos sistemas VGI se adequem aos padrões de qualidade das agências oficiais de mapeamento (MUMMIDI & KRUMM, 2008; ANAND et al, 2010; VAN EXCEL et al, 2010; BRAVO et al, 2013).

Deste modo, pode-se notar pelas discussões apresentadas, que o tema “qualidade” é recorrente na literatura quando se trabalha com informações geográficas voluntárias. Nesse sentido, como uma das intenções deste trabalho é discutir a atual abordagem ao tema qualidade de dados espaciais, entende-se que é necessário que se perceba como se pensa qualidade de dados espaciais tanto no contexto moderno dos usuários produtores ou “producers” — VGI (BUDHATHOKI et al, 2008), quanto no contexto clássico — PGI (Professional Geographic Information).

2.3. Qualidade da Informação Espacial: Transições e Conceitos

Parker (2012) indica que a informação geográfica advinda de pessoas com conhecimento sobre Cartografia (PGI) é aquela “criada por meio de técnicas tradicionais ou profissionais” (KEßLER & GROOT, 2013). Esse tipo de informação foi, por muito tempo, a única existente e a abordagem na qual é concebida será denominada nesta discussão, como visão “clássica”. Entende-se, portanto, que do ponto de vista clássico do conteúdo PGI, o processo de criação das informações contidas num mapa guarda mecanismos de avaliação de qualidade conhecidos, como aqueles estudados nos capítulos da obra “Elements of Spatial Data Quality”, organizada por Guptill & Morrison (1997), ou mesmo, nas normas da ISO:19113 “Geographic Information – Quality Principles” (ISO, 2001). Por conseguinte, estudar a qualidade de dados geográficos no contexto PGI é, sobremaneira, menos

oneroso que no VGI, pois, é possível afirmar que pouco se sabe sobre a qualidade das informações geográficas voluntárias além daquelas tentativas sintetizadas, aqui, pelos estudos de Haklay (2010), Parker (2012) e Keßler & Groot (2013).

Sabe-se que, com a crescente participação de usuários imperitos em Cartografia na produção e na disseminação de informação espacial, dilataram-se as complicações para se estudar os elementos indicadores da qualidade (GRIFFIN & FABRIKANT, 2012). Nesse sentido, há de se pensar em novos critérios de avaliação da qualidade, baseados em conceitos que levem em consideração a influência dos fatores que antes eram inoperantes no processo de criação e disseminação das informações geográficas, bem como, há de se criar modelos que assimilem a entrada de usuários no processo de disseminação e produção da geoinformação (PARKER, 2012; MOONEY & CORCORAN, 2012).

Entretanto, já existem alguns interessantes esboços de caminhos para se estudar a qualidade das informações geográficas voluntárias. De maneira mais abrangente, segundo a ISO:19113, qualidade é composta pela “totalidade das características de um produto que afetam sua capacidade de satisfazer necessidades explícitas e implícitas”, i.e., satisfazer os requisitos (SOMMERVILLE, 2003). Neste contexto, satisfazer os requisitos significa satisfazer as necessidades e/ou expectativas, por exemplo, dos usuários de um determinado produto. Esses requisitos foram previamente definidos por meio de estudos prospectivos, como os feitos por meio dos processos de Engenharia de Requisitos (SOMMERVILLE, 2003).

Na Cartografia, os pesquisadores buscam compreender o conceito de qualidade por meio de dois aspectos: a qualidade posicional e a semântica. Como também afirmado outrora, a maior parte destas pesquisas concentram-se no quão posicionalmente acurados são tais dados; pouco se conhece acerca de sua qualidade semântica, muito menos sobre os fatores humanos envolvidos em sua concepção (PARKER, 2012; MOONEY & CORCORAN, 2012; VAN EXCEL, DIAS & FRUIJITIER, 2010). Sabe-se, no entanto, da importância da satisfação do usuário para se atribuir o grau de qualidade às informações geográficas, o que está relacionado aos fatores humanos estudados por Parker (2012) e, também, à qualidade semântica (VAN EXCEL et al, 2010). Adota-se, portanto, neste artigo, a proposição de que a satisfação do usuário é o principal indicador, o qual deve servir de parâmetro para a avaliação final da qualidade (semântica e posicional) (IVÁNOVÁ et al, 2013), conceito atrelado à usabilidade (ANDRIENKO et al, 2002; VAN ELZZAKER, 2004; PARKER, 2012; BROWN et al, 2012; ISO, 2011).

Dessa maneira, o produto de geoinformação, como forma de representação de categorias (MACEACHREN, 1991; 1995), deve comunicar-se com os indivíduos de modo a salientar os aspectos da paisagem os quais são importantes para as tarefas desempenhadas por quem os usa (VAN ELZAKKER, 2004). Além disso, tal representação precisa ser elaborada de acordo com um propósito bem esclarecido, para que auxilie os usuários nas tarefas por eles desenvolvidas e atinja um grau efetivo de qualidade. De todo o modo, isso quer dizer que todo e qualquer produto

e/ou processo deve ser desenvolvido de acordo com as necessidades dos usuários para que seja aferido, com clareza, seu grau de pertinência para a tarefa a ser auxiliada.

Entretanto, a forma como é conduzida a etapa de investigação das necessidades dos usuários dos produtos de geoinformação, pode ser compreendida como um elemento de fragilidade à reprodução dos procedimentos de reconhecimento de tais necessidades. Pensando em suprir essa demanda, van Elzakker (2004) desenvolveu uma metodologia de investigação de uso de produtos de geoinformação, baseando-se em experimentos práticos que deram respostas substanciais à compreensão das necessidades dos usuários de tais produtos. Para ele, os mapas são peças fundamentais no desenvolvimento das relações humanas no espaço geográfico, pois permitem que os indivíduos visualizem todas as informações necessárias de maneira simplificada, filtrada. Van Elzakker (2004) ainda indica que para se obter filtros que funcionem, o que deve ser melhorado são os métodos empregados na obtenção dos requisitos.

Além das tentativas de van Elzakker (2004), sabe-se que há poucos trabalhos científicos que propuseram técnicas a serem aplicadas para se conhecer as necessidades dos usuários que trabalham com mapas (SLUTER et al, 2013). No entanto, em outras áreas, como é o caso da Engenharia de Software, existem procedimentos estabelecidos que garantem que o desenvolvimento de produtos seja feito a contento das necessidades dos consumidores, gerando satisfação por parte dos usuários. Esses procedimentos permitem a homogeneização da aquisição do conhecimento necessário para produção de soluções por parte do desenvolvedor. Cabe, então, à Engenharia de Requisitos guiar o desenvolvimento de softwares, ou estabelecer metodologias para se conhecer as necessidades dos usuários (SOMMERVILLE, 1992; NUSEIBEH & EASTERBROOK, 2000; ZAVE, 1997), os quais podem ser aplicados na Cartografia.

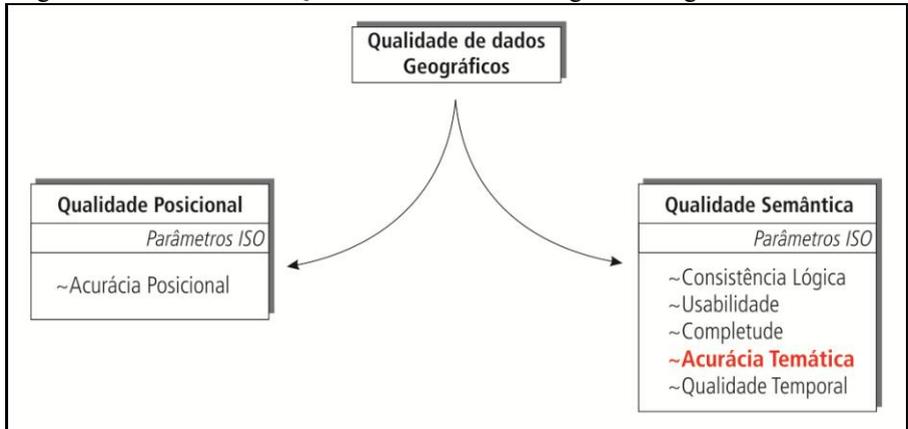
Na Engenharia de Requisitos presume-se que os requisitos são definidos de acordo com o “universo do discurso” que, por sua vez, é a visão real ou hipotética do mundo que inclui tudo aquilo que for de interesse (do usuário) (SOMMERVILLE, 1992). Para que o universo do discurso seja bem compreendido, os procedimentos de elicitação dos requisitos devem ser desenvolvidos a contento da premissa de se conhecer as necessidades dos usuários. As especificações do produto final devem conter, portanto, a descrição do universo do discurso e os procedimentos de elicitação dos requisitos, afim de traduzir essa realidade para uma base de dados compatível com as necessidades dos usuários (SOMMERVILLE, 1992).

Apesar de serem bem definidos os procedimentos de elicitação dos requisitos, o processo de atribuição de qualidade à informação pode, ainda, ser subjetivo, mesmo diante de toda essa sistematização. Isso ocorre, pois um mesmo produto de geoinformação, por exemplo, pode servir para diversas atividades; portanto, a pergunta que resta é: como qualificá-los? A ISO (International Organization for Standardization) é uma das organizações que têm se preocupado com esse tema.

Atenta às necessidades dos usuários e produtores da informação espacial, estudou maneiras de se atribuir qualidade aos produtos de geoinformação e aos processos a eles relacionados; tentou desnudar, também, a forma como é classificada a qualidade, seus atributos, bem como, os parâmetros de avaliação que a constituem. Entretanto, o fez de maneira genérica e com uma abordagem voltada às necessidades de órgãos oficiais, mais próxima ao contexto clássico de produção cartográfica. Apesar de abrangerem muitos aspectos relevantes à aferição do grau de pertinência de informações espaciais muito próximos àqueles assinalados por Guptill & Morrison (1997), não contemplam, por exemplo, aspectos que surgiram com as mudanças na produção da geoinformação, itens materializados na concepção dos sistemas de informações geográficas voluntárias.

Nesse sentido, os parâmetros da qualidade das informações espaciais definidos pela ISO:19114 (ISO, 2001) e reavaliados na ISO:19157 (ISO, 2011), estão representados no esquema a seguir (Figura 4). Eles são os elementos norteadores da avaliação da qualidade das informações espaciais, bem como, balizadores da aferição da compatibilidade dessas informações com um determinado contexto de uso. Ainda na Figura 4, destaque especial é dado ao item “acurácia temática” uma vez que é neste elemento no qual funda-se o estudo da confiabilidade semântica, entidade que abrange aspectos que englobam características interessantes às investigações que propõem-se a estudar a qualidade semântica das informações geográficas.

Figura 4 – Parâmetros da Qualidade dos Dados Geográficos segundo a ISO:19157.



No esquema da Figura 4 pode-se observar que a qualidade atrelada às informações geográficas, segundo a ISO:19157, é decomposta em dois tipos: qualidade posicional e qualidade semântica (o que não difere em nada do esquema que é adotado para as pesquisas tanto em PGI quanto em VGI). Portanto, pode-se dizer que a qualidade posicional é mensurada por meio da averiguação da acurácia

posicional associada à feição cartográfica. Nesse sentido, a ISO:19157 (ISO, 2011) define:

□ *Acurácia Posicional*: acurácia da posição das feições num determinado sistema de referência espacial.

Adicionalmente, tem-se os elementos indicadores da qualidade semântica num outro campo. No esquema da Figura 4 é possível observar o grande peso atribuído à avaliação da qualidade nesta modalidade, uma vez que existem cinco parâmetros de análise a ela associados. Suas componentes e respectivas definições, segundo a ISO:19157 (ISO, 2011) são as que seguem:

□ *Consistência Lógica*: grau de aderência às regras lógicas da estrutura de dados, atribuição e relacionamentos;

□ *Usabilidade*: é baseada nos requisitos dos usuários e na aderência que têm as informações às necessidades destes;

□ *Compleitude*: presença ou falta de feições, seus atributos ou relacionamentos;

□ *Acurácia Temática*: acurácia dos atributos quantitativos, quão corretos são os não quantitativos e as classificações das feições e seus relacionamentos.

□ *Qualidade Temporal*: qualidade dos atributos temporais e dos relacionamentos temporais entre feições.

Ao se analisar os parâmetros, bem como suas componentes descritivas, percebe-se que ainda há uma lacuna acerca do entendimento dos fatores humanos envolvidos na atribuição da qualidade às informações geográficas, exceto no item “acurácia temática”, modalidade na qual alguns pesquisadores acreditam englobar a avaliação da confiabilidade semântica (PARKER, 2012; FLANAGIN & METZGER, 2008; KEßLER & GROOT, 2013). Segundo Parker (2012), entender os fatores humanos envolvidos na criação da informação espacial permitirá a atribuição da qualidade a esta, bem como possibilitará o uso de informações geográficas voluntárias em atividades que demandam o esclarecimento de tal aspecto: mas, se os fatores humanos não foram estudados nem para o contexto clássico por instituições como a ISO, como entendê-los, então, no contexto moderno do voluntariado? Parker (2012) admite a dificuldade de se estudar tais fatores, contudo, adverte que tentativas devem ser feitas para que, num futuro próximo, as informações geográficas voluntárias circulem dentro das agências oficiais de mapeamento como verdadeiras aliadas ao processo de atualização, e por que não dizer de construção, das bases cartográficas oficiais.

3. CONCLUSÕES

Por intermédio de uma discussão conceitual, foi possível observar que, num primeiro momento, a produção de dados geográficos estava centrada em profissionais com conhecimento formal em cartografia (PGI). Baseando-se em Peterson (1997; 2001), O’Reilly (2007) e em outros autores, apontou-se que a Internet, em comunhão com diversas outras mudanças tecnológicas ocorridas no decorrer das últimas seis décadas, foi o que impulsionou a disseminação dos

produtos cartográficos no cotidiano das pessoas e, conseqüentemente, mudou os componentes clássicos operantes na produção da informação espacial.

Assim sendo, as discussões de Peterson (1997; 2001) permitiram que se desenhasse o relacionamento de suas ideias com aquelas mais atuais acerca do papel dos usuários sem conhecimento em cartografia para com a produção de dados geográficos. E foi no conceito dos sistemas produzidos à luz da WEB 2.0 que se buscou fundamentação para se explicar o nascimento dos sistemas VGI, suas funcionalidades, bem como as discussões científicas acerca de sua natureza e potencialidades. Em Goodchild (2007), Haklay (2010), Flanagan & Metzger (2008), Parker (2012) e alguns outros autores, construiu-se a problemática da qualidade de dados geográficos na era dos “producers” (BUDHATHOKI et al, 2008). Nas normas da ISO, buscou-se os conceitos relativos ao tema qualidade de dados geográficos. Nesta tarefa verificou-se a inexistência de propostas que considerem os fatores humanos (e.g., interação humanos computadores, esquemas de conhecimento, categorização mental) na verificação da qualidade, tema que já tem figurado na literatura científica, assim como nos estudos de Parker (2012), Mooney & Corcoran (2012) e Keßler & Groot (2013).

Procurou-se mostrar a evolução dos conceitos que modificaram a forma como se pensa em Cartografia, nas últimas décadas. Suscintamente, atrelou-se à problemática trabalhada, o conceito de qualidade, o qual permeia grande parte das discussões acerca da conexão das bases cartográficas oficiais com aquelas não oficiais, voluntárias. Indicou-se que os sistemas VGI, como escopo de pesquisa recente, têm se mostrado importantes plataformas de estudo nas quais grandes institutos de mapeamento têm ancorado suas expectativas no tocante à atualização de suas bases de informação (BEARDEN, 2007; VAN EXCEL, 2010; USGS, 2013, HAKLAY, 2010; HAKLAY, 2013). Todavia, é importante ressaltar que existem desafios que travam a interligação de tais sistemas com aqueles oficiais e é responsabilidade da comunidade científica solver tais impasses, possibilitando que o maior número possível de indivíduos tenha acesso a informações espaciais atualizadas e de qualidade assegurada.

Portanto, intencionou-se sinalizar com este artigo que há de se discutir um movimento de adequação que faça desmotivar a inércia para o melhoramento de ambas as esferas de produção de geoinformação — oficial e não oficial. Por exemplo, na maioria dos países cujos momentos tecnológicos (CASTELLS, 2008) promovem grandes evoluções das ferramentas de gestão do território, assim como no Brasil, as ações de integração, como as Infraestruturas de Dados Espaciais, têm como marcos regulamentadores normas que, por vezes, atrapalham a inserção deste tipo de plataforma de disseminação do conteúdo geográfico num contexto mais dinâmico, como aquele incitado pelos sistemas VGI. Isso quer dizer que, precisa-se pensar em quais termos as normas efetivamente protegem a qualidade das informações das bases oficiais e, também, em quais termos prejudicam os avanços das iniciativas integradoras.

4. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pela bolsa GM (Mestrado), processo 132398/2012-5, concedida ao pós-graduando João Vitor Meza Bravo, bem como à bolsa produtividade PQ2 concedida à pesquisadora Prof^ª. Dr^ª. Claudia Robbi Sluter. Agradecemos, também, aos professores Dr. Fernando Luiz de Paula Santil, Dr^ª. Maria Cecília Bonato Brandalize, Dr^ª. Luciene Stamato Delazari e Dr^ª. Ivana Ivánová, pelas contribuições no desenvolvimento das discussões.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAND, S.; MORLEY, J.; JIANG, W.; DU, M.; HART, G. JACKSON, M. When worlds collide: combining Ordnance Survey and Open Street Map data. *Proceedings of agigeocommunity* 10, 2010.
- ANDRIENKO, N.; ANDRIENKO, G.; VOSS, H.; BERNARDO, F.; HIPÓLITO, J.; KRETCHMER, U. Testing the usability of interactive maps in Common GIS. *Cartography and Geographic Information Science*, v.29, n.4, , 2002. pp.325
- BEARDEN, M. J. The National Map Corps, 2007. Disponível em <www.ncgia.ucsb.edu/projects/vgi/docs/position/Bearden_paper.pdf>, acessado em outubro de 2013.
- BURROUGH, P. A. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- BROWN, M.; SHARPLES, S.; HARDING, J.; PARKER, C. J.; BEARMAN, N.; MAGUIRE, M.; FORREST, D.; HAKLAY, M.; JACKSON, M. *Usability of Geographic Information: current challenges and future directions*. Applied Ergonomics, 2012. (no prelo).
- BUDHATHOKI, N. R.; BRUCE, B. C.; NEDOVIC-BUDIC, Z. Reconceptualizing the role of the user of spatial data infrastructure. *GeoJournal*, vol. 72, 2008
- CASTELLS, M. *A galáxia da internet: reflexões sobre a internet, os negócios e a sociedade*. Tradução de Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed. 2003.
- CLOUD, J. American Cartographic Transformations during the Cold War. *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 29, n. 3, 2002. pp. 261-282
- COLEMAN, J. D.; GEORGIADOU, Y.; LABONTE, J. Volunteered Geographic Information: The nature and motivation of producers. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research*, vol.4, 2009.
- COPPOCK, J. T.; RHIND, D. W. The History of GIS. In: MAGUIRE, M. F.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. Harlow, U.K.: Longman Group. 1991. pp. 21-43.
- CORMODE, G.; KRISHNAMURTHY, B. Key differences between Web 1.0 and Web 2.0. *First Monday*, vol.13, n.6, 2008.
- COWEN, D. J. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, n. 11, 1988.

- DICK, M. V. P. A. *A motivação toponímica e a realidade brasileira*. São Paulo: Edições Arquivo do Estado de São Paulo, 1990.
- ELZAKKER, C. P. J. M. Van, *The Use of Maps in the Exploration of Geographic Data*. Tese de doutoramento, Netherlands Geographical Studies 326, ITC, Utrecht/Enschede. 2004.
- FAIRBAIN, D. J. The frontier of cartography: mapping a changing discipline. *Photogrammetric Record*, vol.14, n. 84, 1994. pp. 903-915.
- FLANAGIN, A. J.; METZGER, M. J. The credibility of volunteered geographic information. *GeoJournal*, vol. 72, 2008.
- GARLANDINI, S.; FABRIKANT, S. I. Evaluating the effectiveness and efficiency of visual variables for geographic information visualization. In: WRAC'H, F. A.; HORNSBY, K. S.; CLARAMUNT, C.; DENIS, M.; LIGOZAT, G. (eds). *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5756, Springer, 2009. pp. 159-176
- GOODCHILD, M. F. Citizens as sensors: the world of Volunteered Geography. *GeoJournal*, vol. 69, 2007.
- GRIFFIN, A. L.; FABRIKANT, S. I. More Maps, More Users, More Devices Means More Cartographic Challenges. *The Cartographic Journal*, vol. 49, n. 4, 2012. pp. 298-301.
- GUPTILL, S. C.; MORRISON, J. L. Elements of Spatial Data Quality. *International Cartographic Association*: Elsevier, 1997. 201p.
- HAKLAY, M. Neogeography and the delusion of democratisation. *Environment and Planning A*, vol. 45, n. 1, 2013. pp. 55-69
- HAKLAY, M. How good is a Volunteered Geographical Information? A comparative study of Open Street Map and Ordnance Survey datasets. *Environmental Planning B, Planning Dev.*, vol. 37, n.4, 2010.
- HAKLAY, M. M.; BASIOUKA, S.; ANTONIOU, V.; ATHER A. How Many Volunteers does it take to map na area well? The validity of Linus's law to Volunteered Geographic Information. *The Cartographic Journal*, vol. 47, n. 4, 2010.
- HAKLAY, M.; SINGLETON, A.; PARKER, C. Web Mapping 2.0: The Neogeography of GeoWeb. *Geography Compass*, n. 2, vol. 6, 2008.
- HEIPKE, C. Crowdsourcing Geospatial Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, 2010.
- ISO 19113: Geographic Information - Quality Principles. *International Organization for Standarization*, 2001.
- ISO 19114: Geographic Information - Quality Evaluation Procedures. *International Organization for Standarization*, 2001.
- ISO 19157: Geographic Information - Data Quality. *International Organization for Standarization*, 2011.
- IVÁNOVÁ, I.; MORALES, J.; de BY, R. A.; BESHE, T. S.; GEBRESILASSIE, M. A. Searching for Spatial data resources by fitness for use. *Journal of Spatial Science*, vol. 58, n. 1, 2013. pp. 15-28

- JOHNSON, P. A.; SIEBER, R. E. Motivations driving government adoption of the Geoweb. *GeoJournal*, vol. 77, 2012.
- KEßLER, C.; GROOT, R. T. A. Trust as proxy measure for the quality of Volunteered Geographic Information in the case os OpenStreetMap. In: VANDENBROUCKE, D.; BUCHER, B.; CROMPVOETS, J. Geographic Information Science at the Heart of Europe. Springer Lecture Notes in *Geoinformation and Cartography*, 2013. pp. 21–37
- KITCHIN, R.; DODGE, M. Rethinking Maps. *Progress in Human Geography*, vol. 31, n. 3, 2007.
- KÖBBEN, B.J. AND KRAAK, M.J. (1999) Web cartography: dissemination of spatial data on the web. In: *Proceedings of the 2nd AGILE conference on Geographic Information Science*, Association of Geographic Information Laboratories in Europe, Roma, 1999. pp. 14-18
- LEEuw, J.; SAID, M.; ORTEGAH, L.; NAGDA, S.; GEOGIADOU, Y.; DEBOLIS, M. An assessment of the accuracy of Volunteered Road Map Production in Westerns Kenya. *Remote Sensing*, n. 3, 2011. pp. 247-256
- LIU, S.; PALEN, L. The New Cartographers: Crisis Map Mashups and the Emergence of Neogeographic Practice. *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 37, 2010.
- LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. *Sistemas e Ciência da Informação Geográfica*. 3ª Edição, Porto Alegre: Bookman, 2013. 540p.
- MACEACHREN, A. M. The role of maps in spatial knowledge acquisition. *The Cartographic Journal*, London, v. 28, p. 152-162, 1991.
- MACEACHREN, A. M. *How maps work: representation, visualization, and design*. New York: The Guilford Press, 1995.
- MACEACHREN, A. M. Cartography and GIS: Facilitating collaboration. *Progress in Human Geography*, vol. 24, n.3, 2000. pp. 445-456
- MONTELLO, D. Cognitive Map-Design Research in the Twentieth Century: Theoretical and Empirical Approaches. *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 29, n. 3, 2002.
- MORRISON, J.L. *Topographic mapping for the twenty first century*. In: RHIND, D. Framework of the world. Cambridge: Geoinformation International, 1997.
- MMUMIDI, L. N.; KRUMM, J. Discovering points of interest from users' map annotations. *GeoJournal*, vol. 72, 2008. pp. 215-227
- NUSEIBEH, B.; EASTERBROOK, S. Requirements Engineering: A Roadmap. In: *Proceedings of the Conference on The Future of Software Engineering (ICSE)*, New York, 2000. pp. 35-46
- O'REILLY, T. What is Web 2.0: Design patterns and business models for the next generation of software. *Communications & Strategies*, vol.65, n.1, 2007.
- ORDNANCE SURVEY. Site <<http://www.ordnancesurvey.co.uk/oswebsite/>>, acessado em março de 2013.
- OPENSTREETMAP. Site <www.openstreetmap.org>, acessado em abril de 2013.

- OXLEY, A. Web 2.0 Applications of Geographic and Geospatial Information. *Bulletin of the American Society for Information Science and Technology*, vol.35, n. 4, 2009. pp. 43-48
- PARKER, C. J. A *Human Factors Perspective on Volunteered Geographic Information*. Tese de doutoramento. Loughborough University, UK, 2012.
- PETERSON, M. P. Trends in Internet map use. In: *Proceedings of the 19th ICA Conference*, Ottawa, 1997.
- PETERSON, M. P. The Development of Map Distribution through the Internet. In: *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference*, Beijing, China, 2001.
- PRIEDHORSKY, R.; TERVEEN, L. The Computacional Geowiki: what, why, and how. In: *Proceedings of the 2008 ACM conference on Computer supported cooperative work*, 2008. pp. 267-276
- SHIVANAND, B.; DRAGIEVI, S. *Collaborative Geographic Information Systems*. Idea Group Publishing, United States, 2006
- SLOCUM, T. A.; MCMASTER, R. B.; KESSLER, F. C.; HOWARD, H. H. *Thematic Cartography and Geovisualization*. 3rd ed. EUA: Prentice Hall Series in Geographic Information Science, 2009.
- TAYLOR, D. R. F. The Canadian Cartographer and the computer: present trends and future challenges. *Cartographica*, vol.10 , n.3 , 1973.
- TOMLINSON, R. F.; PETCHENIK, B. B. Reflections on the revolution: the transition of analogue to digital representations of space. *The American Cartographer*, vol. 15, n. 3, 1988.
- TUAN, Y. Images and Mental Maps. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 65, n. 2, 1975.
- TURNER, A. Neogeography - towards a definition. A weblog posting. Disponível em <<http://highearthorbit.com/neogeography-towards-a-definition/>>, publicado em 2007, acessado em agosto 2012.
- USGS, United States Geological Survey. The National Map Corps. Disponível em <www.nationalmap.gov/TheNationalMapCorps/>, acessado em outubro de 2013.
- WIKIMAPIA. Site, disponível em <www.wikimapia.org>, acessado em outubro de 2012.
- ZEVA, P. Classification of research effort in requirements engineering. *ACM Computer Surveys (CSUR)*, v. 29, n.4, 1997. pp. 315-321.
- ZOOK, M.; GRAHAM, M.; SHELTON, T.; GORMAN, S. Volunteered Geographic Information and Crowdsourcing Disaster Relief: A Case Study of the Haitian Earthquake. *World Medical & Health Policy*, vol. 2, n. 2, 2010.

(Recebido em agosto 2014. Aceito em novembro de 2014).

INFLUÊNCIA DO GÊNERO NA DEMANDA VISUAL POR MAPAS EM ESCALAS DIFERENTES EM SISTEMA DE NAVEGAÇÃO E GUIA DE ROTA

*The gender effect on visual demand for maps at different scales in route guidance
and navigation system*

ANA PAULA MARQUES RAMOS ¹
MÔNICA MODESTA SANTOS DECANINI ²
EDMUR AZEVEDO PUGLIESI ³
VILMA MAYUMI TACHIBANA ⁴

Universidade Estadual Paulista - UNESP

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

^{2,3} Departamento de Cartografia; ⁴ Departamento de Estatística

R. R. Simonsen, 305 CEP 19060-900 – Pres. Prudente – São Paulo – Brasil
marques.engcart@gmail.com; monca@fct.unesp.br; edmur@fct.unesp.br;
vilma@fct.unesp.br

RESUMO

Este trabalho investiga a influência do gênero do motorista na demanda visual por mapas dinâmicos exibidos em diferentes escalas em Sistemas de Navegação e Guia de Rota em Automóvel- SINGRA. Um grupo de 26 homens e 26 mulheres participou de um teste realizado em um simulador de direção de baixo custo. A tarefa do motorista consistiu em realizar uma viagem por uma rota desconhecida, auxiliado por um protótipo de SINGRA que exibe mapas em duas diferentes escalas. Este trabalho replica os achados da literatura a respeito de que há uma relação significativa entre o gênero e o desempenho em tarefas visuo-espacial. Os resultados mostram que motoristas de diferentes gêneros apresentam diferentes níveis de demanda visual, tanto para a variação da escala do mapa quanto para a variação da complexidade da manobra. Estes resultados são discutidos com base nas diferenças individuais em termos de habilidade espacial e ansiedade espacial.

Palavras chaves: Sistema de Navegação; Guia de Rota em Automóvel; Escalas; Gênero; Demanda Visual.

ABSTRACT

This work investigates the gender effect on visual demand of drivers for dynamic maps at different cartographic scales presented In-Vehicle Route Guidance and Navigation System (RGNS). A group of 52 subjects (26 males and 26 females) took part in an experiment performed in a low-cost driving simulator. The driver's task consisted of navigating in an unknown route using a RGNS prototype which presents maps at two different cartographic scales. This paper replicates the known phenomenon of significant relationships between gender and performance at visual-spatial tasks issue. Our results show that drivers of different genders present distinct levels of visual demand both due to the cartographic scales and maneuver complexity variation. These discussed results are based upon individual differences in terms of spatial ability and spatial anxiety.

Keywords: Navigation System; In-vehicle Route guidance; Scales; Gender; Visual Demand.

1. INTRODUÇÃO

A análise do movimento dos olhos é um método tradicionalmente aceito para determinar a demanda visual por uma interface e, assim, estudar os problemas de usabilidade no contexto da Interação Homem-Máquina (Human Computer Interaction – HCI) (TSIMHONI et al., 1999; POOLE & BALL, 2005). Os Sistemas de Navegação e Guia de Rota em Automóvel (SINGRA) são alguns desses tipos de interfaces utilizados dentro dos automóveis para oferecer maior mobilidade e conforto aos motoristas na tarefa de navegação, porém que requerem demanda visual associada à tarefa de direção (KABER et al., 2012). A análise de demanda visual é utilizada como uma medida de avaliação da eficiência de uma interface (POOLE & BALL, 2005). No contexto de SINGRA, esta medida é adotada para compreender as implicações que a leitura de mapa, com o automóvel em movimento, resulta no desempenho do motorista na tarefa de direção (LABIALE, 2001; PUGLIESI et al., 2009; CHING-TORNG et al., 2010).

Um dos desafios atuais para a área de HCI é melhorar a qualidade dos mapas de navegação utilizados por motoristas de diferentes grupos (ex.: gênero, idade, etc.) e (ou) com distintas características individuais (ex.: habilidade espacial, formação educacional, etc.) (PUGLIESI et al., 2009; LAVIE et al., 2011; LAVIE & ORON-GILAD, 2013; RAMOS et al., 2014b). Dentre as importantes vertentes de pesquisa na área de HCI, destaca-se a seleção da escala dos mapas de SINGRA (UANG & HWANG, 2003; HO & LI, 2004; DILLEMUTH, 2007; LEE et al., 2008; SHELEIBY et al., 2008; WU & ZHANG, 2009; BINFENG et al., 2012; MARQUES et al., 2012; RAMOS et al. 2014c). O intuito das investigações é aumentar a eficiência do motorista no processo de leitura de mapa, sem comprometer seu desempenho na tarefa de direção do automóvel.

A necessidade de se considerar as características individuais e de grupo no projeto de interfaces decorre do fato de que tais características influenciam no desempenho dos usuários ao realizarem determinadas tarefas, principalmente, as de

caráter visuo-espacial (KOZLOSWKI & BRYANT, 1977; DABBS et al., 1998; MONTELLO et al., 1999; COLUCCIA et al., 2007; WILKENING & FABRIKANT, 2011). Diante dessas evidências, os usuários de SINGRA que interagem com mapas durante a direção do automóvel não deveriam ser considerados um grupo homogêneo; pelo contrário, suas características individuais e de grupo deveriam ser levadas em consideração no projeto desses sistemas.

O gênero é uma importante característica de grupo para o contexto de uso de um SINGRA, visto que o número de motoristas mulheres cresceu significativamente nos últimos anos (WAKABAYASHI, 2011), e isso pode diversificar a forma como os mapas são utilizados na navegação em automóvel. Mundialmente, as mulheres são responsáveis pela venda de 30 milhões de automóveis por ano (FREE PRESS, 2013). Apenas nos EUA, as mulheres são responsáveis pela compra de 54% dos automóveis vendidos anualmente e influenciam em mais de 80% nas vendas (FLEMING, 2013). Pei-Chun e Shang-I (2013) afirmam que a mudança no segmento de compradores de automóveis é um fator que deve ser considerado no projeto de interfaces que serão utilizadas para apoiar a tarefa de navegação.

Slocum et al. (2001) sugerem usar as diferenças em desempenho para entender como a informação espacial apresentada na forma dinâmica (ex.: mapas animados) é compreendida e utilizada por indivíduos de diferentes gêneros. Todavia, até o momento, não há resultados que mostrem a relação entre o gênero do motorista e sua demanda visual por mapas dinâmicos exibidos em diferentes escalas, em sistemas de navegação e guia de rota. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a demanda visual de motoristas dos gêneros masculino e feminino por mapas de SINGRA em diferentes escalas. As questões investigadas são: “Os motoristas do gênero masculino apresentam demanda visual similar aos motoristas do gênero feminino ao interagirem com mapas em diferentes escalas para realizarem diferentes tipos de manobras?”; “A demanda visual gerada nos homens e nas mulheres está relacionada com a variação da escala do mapa?”; e “A demanda visual gerada nos homens e nas mulheres está relacionada com a complexidade da manobra que está sendo representado no mapa?”.

2. MÉTODO

2.1 Participantes

O teste foi realizado com um grupo de 52 motoristas voluntários, 26 homens e 26 mulheres (Tabela 1). Para serem considerados aptos a participarem do teste, os motoristas deveriam possuir: Carteira Nacional de Habilitação (CNH), experiência na direção de automóvel por pelo menos dois anos, visão normal de cores, idade inferior a 40 anos, e pouca ou nenhuma familiaridade com a rota experimental, conforme abordagem utilizada por Ching-Torng et al. (2010), Pugliesi et al. (2009) e Ramos et al. (2014b). Essas informações de caracterização individual foram coletadas por meio de um questionário, o qual foi aplicado em forma de entrevista semiestruturada. Aplicou-se também um teste de habilidade espacial, o teste

‘Tomada de Perspectiva/Orientação Espacial’ (Perspective Taking/Spatial Orientation Test - PT/SOT) de Hegarty e Waller (2004).

O teste PT/SOT é composto por 12 questões sobre a orientação relativa entre ‘n’ objetos no espaço. A tarefa do indivíduo é imaginar-se de pé, em frente a um objeto de uma cena, olhando para um segundo objeto, e desenhar uma seta que indique a direção de um terceiro objeto. Este teste é recomendado para avaliar a habilidade espacial relacionada a tarefas que envolvem a manipulação mapas (HEGARTY; WALLER, 2004). O intuito da aplicação do teste PT/SOT foi o de determinar a habilidade espacial dos motoristas, em termos de sua habilidade de orientação e, com isso, avaliar se esta característica está relacionada ao gênero ou ao seu desempenho na tarefa de navegação. A habilidade espacial refere-se à capacidade de um indivíduo produzir, representar, transformar e recuperar a informação espacial em sua memória de longa duração (COLUCCIA; LOUSE, 2004).

Tabela 1 – Estatística descritiva.

Gênero	Idade dos participantes do teste				
	Mínima	Máxima	Média	Desvio-padrão	Total
Masculino	21	37	27,5	4,83	26
Feminino	22	38	28,6	4,41	26
Total médio	21,5	37,5	28,05	4,62	Soma = 52

2.2 Rota Experimental e Simulador de Direção

A rota é composta por 13 manobras, das quais oito são manobras simples (ex.: manobra à direita, manobra à esquerda), e cinco são manobras complexas (ex.: rotatória). O levantamento dos dados em campo consistiu em filmar a rota experimental e registrar suas coordenadas. A filmagem foi realizada com um telefone celular (marca Iphone 4S), e o levantamento das coordenadas com um GPS Garmin 12 XL, no formato NMEA 2.0.

O aparato tecnológico utilizado na avaliação da eficiência das representações cartográficas consistiu em um simulador de direção de baixo custo, com base fixa, pertencente à FCT/UNESP. Para simular uma viagem, o simulador sincroniza a reprodução do vídeo da rota percorrida em campo, com a simulação do deslocamento do automóvel pela rota em um protótipo de SINGRA áudio-dinâmico desenvolvido na FCT/UNESP (PUGLIESI et al., 2009; MARQUES et al., 2012). O recorte da cabina de um automóvel Renault Clio/1991 é usado como veículo. O vídeo da rota é exibido em uma tela de projeção (2,4 x 1,8m), e os mapas do SINGRA em um monitor de sete polegadas (1024x768 pixels). O monitor é posicionado na parte central e superior do painel do automóvel, voltado para a face do motorista, sem obstruir seu campo de visão, conforme recomendações da literatura (WITTMANN et al., 2006).

O movimento dos olhos do motorista foi registrado pela câmara de um tablet (1024x768 pixels) com resolução de três megapixels, o qual é posicionado atrás do monitor de navegação. A reprodução do som do automóvel e do ambiente externo, registrados em campo, bem como o som do sistema de navegação (beep) é realizada por um par de caixas de som localizadas atrás dos bancos dianteiros do automóvel.

2.3 Representações Cartográficas em Diferentes Escalas

As representações foram exibidas em duas escalas: 1:3.000 e 1:6.000, na resolução de 1024x768 pixels. Estas escalas foram definidas com base nos resultados apresentados por Marques et al. (2012) e Ramos et al. (2014a). O projeto gráfico das representações foi realizado no ArcGIS ArcInfo 10.0. A implementação destas no protótipo de SINGRA foi feito utilizando o compilador Microsoft Visual Basic 6.0 e a biblioteca ESRI Mapobjects 2.1. Nas Figuras 1 e 2 estão algumas das representações projetadas nas duas diferentes escalas para informar a direção em manobras simples e complexa. Estas figuras estão em tamanho cinco vezes menor em relação às imagens apresentadas aos motoristas durante o teste.

Figura 1 – Mapa na escala 1:3.000 (a) e 1:6.000 (b) para a representação de manobra simples.

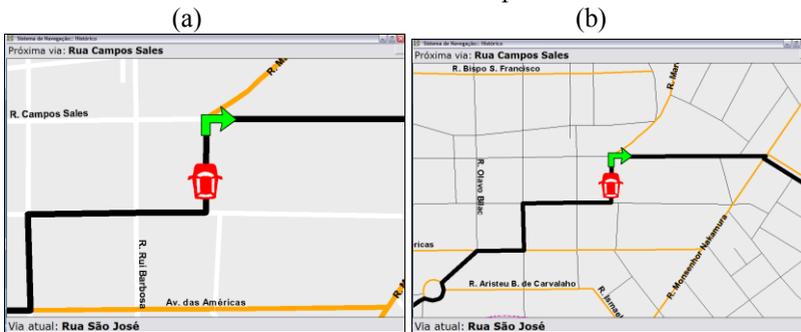


Figura 2 – Mapa na escala 1:3.000 (a) e 1:6.000 (b) para a representação de manobra complexa.



2.4 Aplicação do Teste no Simulador

O teste foi iniciado com uma breve explanação da pesquisa e a familiarização do motorista com o simulador de direção. O motorista foi orientado a manusear os controles do veículo (ex.: girar o volante, usar o câmbio de marchas e sinalizadores), porém foi enfatizado que qualquer movimento não alteraria o cenário de simulação. Na sequência, o motorista fez o preenchimento do questionário de caracterização individual, realizou o teste de orientação espacial e assinou o termo de consentimento. Além disso, o motorista foi familiarizado com o beep e, também, com os mapas nas duas diferentes escalas por meio da apresentação de um ‘manual de símbolos’ do sistema.

Antes de iniciar a tarefa de simulação da direção, os motoristas foram divididos em dois grupos similares de 13 homens e 13 mulheres cada um. O intuito foi manter uma aleatoriedade na ordem de exibição das escalas para evitar influências nos resultados de demanda visual. O primeiro grupo iniciou a tarefa de simulação usando mapas em 1:3.000 (manobras de 1 a 6) e finalizou esta tarefa com mapas em 1:6.000 (manobras de 7 a 13). O segundo grupo utilizou a ordem inversa; primeiro os mapas em 1:6.000 (manobras de 1 a 6) e, depois, em 1:3.000 (manobras de 7 a 13).

Durante a realização da tarefa de simulação da direção, o motorista foi orientado a realizar duas tarefas: uma principal e uma secundária. A principal consistiu em prestar a máxima atenção no vídeo da rota, como se estivesse dirigindo o automóvel no mundo real para evitar riscos de acidente no trânsito. A tarefa secundária consistiu em consultar o monitor de navegação, preferencialmente, depois de ouvir o beep, para obter a informação de direção de manobra. O beep foi disparado quando o automóvel se encontrava a cerca de 100 metros ou menos da manobra, representando o início da tarefa tática como abordagem adotada por Pugliesi et al. (2009). A tarefa tática é considerada a etapa mais crítica da navegação do ponto de vista da segurança, porque durante esta tarefa o motorista requer um maior apoio do sistema, resultando em uma maior demanda de processamento mental por parte do usuário (BURNETT, 1998; LABIALE, 2001; KABER et al., 2012).

2.5 Extração da Demanda Visual

A caracterização da demanda visual foi realizada a partir de um conjunto de cinco variáveis, quais sejam: número de olhadas, duração mínima da olhada, duração máxima da olhada, duração média da olhada e soma das olhadas. Este conjunto são as variáveis mais importantes no processo de quantificação da demanda visual (TSIMHONI et al., 1999; KLAUER et al., 2006; PUGLIESI et al., 2013). O ‘Número de olhadas’ (NO) é a quantidade de vezes que uma interface é consultada durante a realização de uma tarefa (TSIMHONI & GREEN, 2001; KLAUER et al., 2006). A ‘Soma das olhadas’ (SomaO) representa o tempo total gasto com os olhos fora da via para consultar uma interface (TSIMHONI &

GREEN, 2001; KLAUER et al., 2006; PUGLIESI et al., 2013). A ‘Duração mínima da olhada’ (DurMin) consiste no menor tempo despedido para consultar a informação no mapa. A ‘Duração média da olhada’ (DurMed) é a soma das olhadas dividida pelo número de olhadas (TSIMHONI et al., 1999), e representa o tempo médio requerido pelo motorista para consultar o mapa. A ‘Duração máxima da olhada’ (DurMax) é a olhada de maior tempo de duração no conjunto de olhadas realizadas para consultar o mapa.

Para extrair os dados de demanda visual, em termos das cinco variáveis quantitativas, adotou-se o método utilizado por Pugliesi et al. (2009) e Ching-Torng et al. (2010). O procedimento consiste em analisar o movimento dos olhos dos motoristas ‘quadro a quadro’ utilizando um reprodutor de vídeo, neste caso o Microsoft Windows Movie Maker. A comparação da demanda visual entre as diferentes manobras da rota foi realizada para o menor intervalo de tempo de duração da tarefa tática, o qual correspondeu a 11 segundos. Assim, para cada um dos 52 motoristas, nas 13 manobras da rota, analisou-se a demanda visual correspondente ao intervalo de 11 segundos restantes até a manobra.

3. RESULTADOS

3.1 Estatística Descritiva

Os dados de demanda visual foram organizados no Microsoft Excel e processados no SPSS 16.0 (Statistical Package for the Social Sciences). Para a organização dos dados, considerou-se as escalas (1:3.000 e 1:6.000), o tipo de manobra - Manobra Simples (MS) ou Manobra Complexas (MC), e as cinco variáveis de caracterização da demanda visual - número de olhadas, duração mínima da olhada, duração máxima da olhada, duração média da olhada e soma das olhadas.

Sobre os dados de cada uma das variáveis de caracterização da demanda visual (variáveis dependentes), fez-se a estatística descritiva e aplicou-se o teste de normalidade, no intuito de se definir o tipo de teste estatístico a ser usado nas análises, se paramétrico ou não-paramétrico. Os resultados da estatística descritiva e do teste de normalidade encontram-se apresentados nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6.

A partir dos resultados do teste de Shapiro-Wilk, aplicado a um nível de confiabilidade de 95%, observou-se que algumas das variáveis de demanda visual não apresentaram distribuição de probabilidade normal (p -valor $>0,05$). Para os conjuntos de dados com distribuição normal, aplicou-se testes não-paramétricos, tais como Wilcoxon e Mann-Whitney U. Para os dados com distribuição desconhecida, aplicou-se testes paramétricos, como teste t para amostras dependentes, e teste t para amostras independentes, conforme recomenda Conover (1999). Quanto aos resultados do teste de orientação espacial, PT/SOT, observou-se que os homens erraram em média $33^\circ (\pm 34,7^\circ)$ na estimativa da direção dos objetos, enquanto as mulheres erraram $64^\circ (\pm 50^\circ)$. Tais resultados serão discutidos na próxima sessão.

Tabela 2 – Estatística para a variável ‘número de olhadas’.

Tipo de manobra - escala	Mínimo / Máximo	Média / Desvio-padrão	Mediana	Shapiro-wilk p-valora
Simple - 1:3.000	1,00 / 7,00	2,72 / 1,23	2,60	0,001
Simple - 1:6.000	1,00 / 5,00	2,53 / 1,01	2,00	0,001
Complexa- 1:3.000	1,33 / 5,50	3,22 / 0,95	3,16	0,121
Complexa- 1:6.000	1,00 / 4,33	2,67 / 0,87	2,58	0,137

^aAssume-se distribuição normal para p-valor superior a 0,05.

Tabela 3 – Estatística para a variável ‘duração mínima da olhada’.

Tipo de manobra - escala	Mínimo / Máximo	Média / Desvio-padrão	Mediana	Shapiro-wilk p-valora
Simple - 1:3.000	0,48 / 1,76	0,85 / 0,25	0,80	<0,0001
Simple - 1:6.000	0,48 / 2,48	0,87 / 0,31	0,80	<0,0001
Complexa- 1:3.000	0,40 / 5,33	2,07 / 1,23	1,96	<0,0001
Complexa- 1:6.000	0,58 / 2,68	1,09 / 0,38	1,04	<0,0001

^aAssume-se distribuição normal para p-valor superior a 0,05.

Tabela 4 – Estatística para a variável ‘duração máxima da olhada’.

Tipo de manobra - escala	Mínimo / Máximo	Média / Desvio-padrão	Mediana	Shapiro-wilk p-valora
Simple - 1:3.000	0,64 / 2,37	1,30 / 0,40	1,24	0,012
Simple - 1:6.000	0,72 / 2,53	1,30 / 0,45	1,20	<0,0001
Complexa- 1:3.000	0,88 / 3,40	1,93 / 0,59	1,84	0,070
Complexa- 1:6.000	0,88 / 4,11	1,75 / 0,60	1,62	<0,0001

^aAssume-se distribuição normal para p-valor superior a 0,05.

Tabela 5 – Estatística para a variável ‘duração média da olhada’.

Tipo de manobra - escala	Mínimo / Máximo	Média / Desvio-padrão	Mediana	Shapiro-wilk p-valora
Simple - 1:3.000	0,59 / 1,79	1,05 / 0,29	1,03	0,001
Simple - 1:6.000	0,68 / 2,48	1,07 / 0,32	0,97	<0,0001
Complexa- 1:3.000	0,74 / 2,66	1,44 / 0,42	1,32	<0,0001
Complexa- 1:6.000	0,81 / 3,17	1,40 / 0,42	1,31	<0,0001

^aAssume-se distribuição normal para p-valor superior a 0,05.

Tabela 6 – Estatística para a variável ‘soma das olhadas’.

Tipo de manobra - escala	Mínimo / Máximo	Média / Desvio-padrão	Mediana	Shapiro-wilk p-valora
Simple - 1:3.000	0,64 / 6,78	2,81 / 1,37	2,52	0,002
Simple - 1:6.000	0,80 / 5,86	2,67 / 1,20	2,36	0,003
Complexa- 1:3.000	1,44 / 6,92	4,41 / 1,36	4,21	0,500
Complexa- 1:6.000	1,44 / 6,46	3,58 / 1,40	3,41	0,013

^aAssume-se distribuição normal para p-valor superior a 0,05.

3.2 Demanda Visual e a Relação com o Gênero

Dois análises foram conduzidas para comparar a demanda visual dos motoristas em relação às representações cartográficas exibidas nas duas escalas, 1:3.000 e 1:6.000. A primeira compara a demanda visual entre os motoristas de diferentes gêneros, homem versus mulher. A partir desta análise, pode-se responder à primeira questão investigada neste trabalho: “Os motoristas do gênero masculino apresentam demanda visual similar aos motoristas do gênero feminino ao utilizarem mapas em diferentes escalas para realizarem manobras simples e complexa?”.

A segunda análise compara a demanda visual de motoristas de mesmo gênero para avaliar se a variação da escala do mapa tem maior influência sobre o desempenho das mulheres ou dos homens, na realização da tarefa tática em manobra simples e manobra complexa. A partir desta segunda análise, pode-se responder às outras duas questões investigadas neste trabalho, quais sejam: “A demanda visual gerada nos homens e nas mulheres está relacionada com a variação da escala do mapa?”; e “A demanda visual gerada nos homens e nas mulheres está relacionada com a complexidade da manobra que está sendo representado no mapa?”.

3.2.1 Demanda Visual em Relação a Motoristas de Diferentes Gêneros

A comparação da demanda visual em função do gênero (Tabela 7) mostrou que as mulheres realizam um maior número de olhadas que os homens, tanto para o mapa exibido em 1:3.000 ($p = 0,008$) quanto em 1:6.000 ($p = 0,071$) em se tratando de manobra simples (Caso A e Caso C). As mulheres também apresentam maior demanda visual comparado aos homens em termos da ‘Soma das olhadas’ ($p = 0,146$) ao navegarem com o mapa em 1:3.000. Isto permite afirmar que os motoristas do gênero feminino despendem mais tempo com os olhos fora da via procurando por informação espacial comparado aos motoristas do gênero masculino. Por outro lado, a duração mínima da olhada ($p = 0,125$) e a duração média das olhadas ($p = 0,187$) realizadas pelos homens é superior ao tempo requerido pelas mulheres para consultarem o mapa em 1:3.000 (Tabela 7).

Em se tratando da tarefa tática em manobra complexa, nenhuma relação foi encontrada entre a demanda visual e o gênero do motorista para o mapa na escala 1:3.000 (Caso B) (Tabela 7). Esta evidência mostra que homens e mulheres têm

desempenho similar, em termos de demanda visual, ao realizarem manobra complexa quando auxiliados por mapa menos generalizado (1:3.000). Há somente uma tendência ($p = 0,129$) dos homens apresentarem valor de duração máxima da olhada superior ao das mulheres quando navegam auxiliados pelo mapa em 1:3.000 (Caso D).

Tabela 7 – Demanda visual por mapas em relação ao gênero dos motoristas.

TESTE ESTATÍSTICO NÃO-PARAMÉTRICO					
Tipo de manobra - escala	Variável de demanda visual	Teste de Mann-Whitney U (média dos ranks)			
		Gênero		Z	p-valor
		Masculino	Feminino		
Caso A: Simples - 1:3.000	NO	20,94	32,06	-2,6559	0,008a
	DurMin	29,71	23,29	-1,533	0,125c
	DurMax	27,77	25,23	-0,605	0,545
	DurMed	29,27	23,73	-1,318	0,187c
	SomaO	23,44	29,56	-1,455	0,146c
Caso B: Complexa - 1:3.000	DurMin	24,46	28,54	-0,971	0,331
	DurMax	26,40	26,60	-0,046	0,963
	DurMed	27,77	25,23	-0,604	0,546
Caso C: Simples - 1:6.000	NO	22,79	30,21	-1,807	0,071b
	DurMin	27,75	25,25	-0,596	0,551
	DurMax	26,52	26,48	-,009	0,993
	DurMed	27,38	25,62	-0,421	0,674
	SomaO	23,92	29,08	-1,226	0,220
Caso D: Complexa - 1:6.000	DurMin	24,71	28,29	-0,852	0,694
	DurMax	29,69	23,31	-1,520	0,129c
	DurMed	28,13	24,87	-0,778	0,437
	SomaO	27,35	25,65	-0,403	0,687
TESTE ESTATÍSTICO PARAMÉTRICO					
NÚMERO DE OLHADAS					
Comparação: M x F		Teste t para amostras independentes			
		Média	Desvio-padrão	t	p-valor
Caso B: Complexa - 1:3.000		3,09 x 3,35	1,075 x 0,820	-0,965	0,339
Caso D: Complexa - 1:6.000		2,67 x 2,67	0,939 x 0,817	0,25	0,980
SOMA DAS OLHADAS					
Comparação: M x F		Teste t para amostras independentes			
		Média	Desvio-padrão	t	p-valor
Caso B: Complexa - 1:3.000		4,26 x 4,55	1,32 x 1,42	-0,785	0,436

Fatores de gênero: M=masculino; F=feminino. a Significativo a um nível de significância de 1%, b a 10% e c Significativo a um nível de significância de 20%.

3.2.2 Demanda Visual em Relação a Motoristas de Mesmo Gênero

Na Tabela 8 e na Figura 3 apresentam-se os resultados obtidos na comparação da demanda visual entre os motoristas de mesmo gênero. Nota-se que, no caso de manobra simples, a variação da escala não influenciou a demanda visual dos motoristas do gênero masculino (Figura 3a) ou feminino (Figura 3b). Neste tipo de manobra, pode-se inferir que ambas as escalas são eficientes para auxiliar motoristas de diferentes grupos. Contudo, no caso de manobra complexa, observa-se que a variação da escala do mapa influencia significativamente o desempenho dos homens e das mulheres. Em pelo menos três variáveis de demanda visual, constatou-se que o mapa em 1:6.000 foi mais eficiente que o mapa em 1:3.000 ao se considerar motoristas de mesmo gênero.

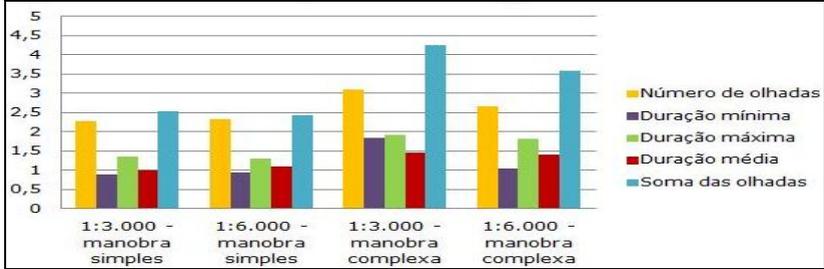
Quanto à comparação do desempenho do motorista em função da variação da complexidade da manobra, tem-se que ambos os grupos de motoristas, homens ou mulheres, apresentaram menor demanda visual ao consultarem o mapa para realizar manobra simples comparado à manobra complexa, independentemente da escala do mapa, 1:3.000 ou 1:6.000. Isso mostra que o aumento na complexidade da manobra influencia na demanda visual, porém este aumento não está correlacionado ao gênero do motorista.

Tabela 3 – Demanda visual para cada tipo de representação cartográfica em relação a motoristas de mesmo gênero.

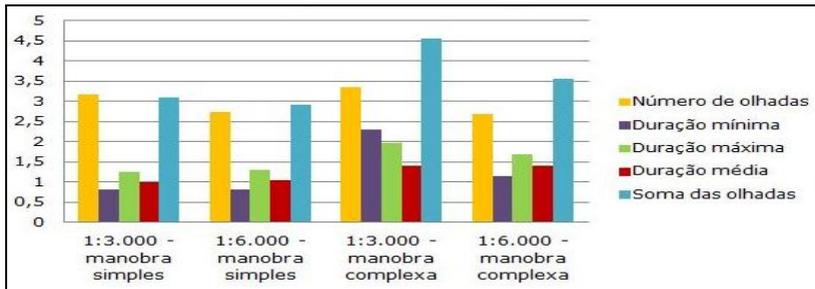
Demanda visual (p-valor)	Variação da escala				Variação da complexidade da manobra			
	Manobra simples (1/3.000 x 1/6.000)		Manobra complexa (1/3.000 x 1/6.000)		1/3.000 (MS x MC)		1/6.000 (MS x MC)	
	M	F	M	F	M	F	M	F
Número de olhadas	0,840	0,158 ^a	0,017 ^b	0,001 ^a	0,001 ^a	0,258	0,126 ^d	0,622
Duração mínima	0,819	0,542	0,005 ^a	0,002 ^a	0,001 ^a	<0,0001 ^a	0,201	<0,0001 ^a
Duração máxima	0,367	0,957	0,393	0,014 ^b	<0,0001 ^a	<0,0001 ^a	<0,0001 ^a	0,041 ^b
Duração média	0,195 ^d	0,298	0,882	0,374	<0,0001 ^a	<0,0001 ^a	<0,0001 ^a	0,002 ^a
Soma das olhadas	0,929	0,501	0,011 ^b	0,005 ^a	<0,0001 ^a	0,001 ^a	<0,0001 ^a	0,069 ^c

Fatores de manobra (MS = Manobra Simples; MC = Manobra Complexa). ^{*} p-valor foi estimado usando o teste não-paramétrico de Wilcoxon. ^{**} p-valor foi estimado usando o teste paramétrico teste t para duas amostras relacionadas. ^a Estatisticamente significativo a um nível de significância de 1%. ^b Estatisticamente significativo a um nível de significância de 5%. ^c Estatisticamente significativo a um nível de significância de 10%. ^d Estatisticamente significativo a um nível de significância de 20%.

Figura 3 – Demanda visual dos motoristas do gênero masculino (a) e feminino (b).



(a)



(b)

4. DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o gênero é uma característica de grupo que influencia no desempenho do motorista ao realizar tarefas visuo-espacial. Verificou-se que quando auxiliados por mapas em diferentes escalas, para realizarem diferentes tipos de manobras, os motoristas apresentaram variações significativas nos valores de demanda visual. Com base nestas constatações três novas questões foram formuladas: “Por que as mulheres olham mais vezes para o mapa e permanecem mais tempo com os olhos fora da via comparado aos homens?”; “Por que os homens apresentam valor de duração mínima, máxima e de duração média da olhada superior ao realizado pelas mulheres?”; e “Por que as diferenças de demanda visual ocorrem, sobretudo, para o caso de manobra simples visualizada em mapa mais detalhado (escala 1:3.000)?”.

O fato das mulheres consultarem mais vezes o mapa e permanecerem mais tempo com os olhos fora da via, comparado aos homens, evidencia que os motoristas do gênero feminino tem maior necessidade de confirmação se rota está sendo percorrida devidamente. Pugliesi et al. (2009) confirmaram que, comparado aos homens, as mulheres requerem um maior número de olhadas para consultar a informação apresentada em mapa de SINGRA, bem como permanecem mais tempo com os olhos fora da via durante a tarefa tática. Segundo Burnett (1998), a necessidade de confirmação da rota ocorre ao longo de toda a tarefa de navegação, e

é parte do estágio de confiança. Este estágio é um dos cinco estágios realizados pelos motoristas durante a manutenção em rota, quais sejam estágio de pré-visualização, identificação, verificação, confiança e orientação.

Do ponto de vista da psicologia, a necessidade de confirmação da rota demonstrada pelas mulheres pode ser explicada com base no conceito de ‘ansiedade espacial’. A ansiedade espacial ou ‘o medo de se perder’ (KOZLOSWKI & BRYANT, 1977) é um tipo de sentimento que ocorre ao realizar a tarefa de navegar por um ambiente não familiar (LAWTON, 1994). Estudos mostram que as mulheres utilizam estratégias diferentes comparadas aos homens ao desenvolverem tarefas de navegação em áreas desconhecidas (DABBS et al., 1998; TSIMHONI et al., 1999; WU et al., 2013). Se por um lado os homens se autotransformam com maior senso de direção e se mostram mais confiantes na sua habilidade em explorar novos caminhos sem o auxílio de um mapa, por outro, as mulheres tendem a apresentar maior nível de ansiedade espacial ao realizarem este mesmo tipo de tarefa (LAWTON, 1994; MONTELLO et al., 1999; COLUCCIA & LOUSE, 2004; WAKABAYASHI, 2011).

Uma das razões apontadas pela literatura para justificar a maior ansiedade espacial por parte das mulheres é o fato de apresentarem menor habilidade espacial (DABBS et al., 1998; COLUCCIA et al., 2007; WAKABAYASHI, 2011; WILKENING & FABRIKANT, 2011). Hooven et al. (2004) afirmam que a habilidade espacial é fortemente influenciada pelo nível de testosterona presente no organismo de um indivíduo. Assim, ao se considera que no teste PT/SOT o senso de orientação dos homens foi duas vezes melhor comparado ao das mulheres, parece que tais resultados corroboraram as afirmações de Hooven et al. (2004), porém estudo complementar é necessário para comprovar tal fato.

Em relação ao fato dos homens terem apresentado valores de duração da olhada (mínima, média e máxima) superiores aos das mulheres, este pode ser justificado em razão do baixo número de vezes que o mapa foi consultado. Um experimento conduzido por Ooms et al. (2012) mostrou que o ‘tempo de aprendizado com o mapa’ foi maior para os homens; porém, uma vez que a informação foi compreendida, estes passaram a ‘ignorar’ o mapa resultando na redução do número de olhadas para a interface. A partir do instante em que o usuário se familiariza com o mapa, a imagem mental deste é recuperada na memória de trabalho do indivíduo permitindo que as tarefas propostas (ex.: compreender a direção da manobra) sejam resolvidas em menor tempo (OOMS et al., 2012). A redução no tempo ou no número de consulta a uma interface é, portanto, decorrente da redução da carga cognitiva gerada na memória de trabalho do usuário (OOMS et al., 2012).

Quanto à pergunta “Por que as diferenças de demanda visual entre gênero ocorrem, sobretudo, para o caso de manobra simples visualizada em mapa mais detalhado (escala 1:3.000)?”, esta pode ser abordada a partir de dois pontos: primeiro, com base no nível de complexidade da manobra e, segundo, com base no nível de detalhamento do mapa. As diferenças de demanda visual entre homens e

mulheres foram observadas somente para o caso de manobra simples, porque em manobras complexas os homens, assim como as mulheres, passaram a consultar o mapa mais vezes e por mais tempo para compreenderem a informação de direção. Estes resultados são similares aos obtidos por Labiale (2001) e Pugliesi et al. (2009). Evans e Stevens (1997) ressaltam que a complexidade gráfica de uma interface dificulta o motorista extrair rápida e corretamente a informação de interesse, contribuindo para a distração na tarefa de direção do automóvel.

Em relação ao nível de detalhamento do mapa, Green et al. (1995) afirmam que os motoristas têm dificuldade em ler mapas detalhados enquanto dirigem. Diante disso, tais autores recomendam minimizar a quantidade de feições no mapa, sejam representadas na dimensão linear (ex.: vias, limites administrativos, hidrografia), pontual (ex.: pontos de referência, marcos, etc.) ou textual (ex.: nomes de via, nome de rio, etc.). As recomendações de Green et al. (1995) são corroboradas por pesquisas recentes, as quais verificaram que os usuários têm melhor desempenho ao interagirem com mapas em menor nível de detalhe (LAVIE et al., 2011; LAVIE & ORON-GILAD, 2013). Um mapa com maior nível de detalhamento pode ser associado a um mapa complexo e que promove o aumento da carga cognitiva na memória de trabalho do motorista. Uma maior carga cognitiva está associada a um aumento no tempo de processamento da informação e, no contexto de SINGRA, isto implica em problemas de eficiência da interface (PUGLIESI et al., 2013).

A redução do desempenho do motorista, em termos de demanda visual, ao interagir com o mapa em 1:3.000 também pode ser explicada em razão da exibição de pouca informação de contexto da rota. Os mapas menos generalizados, embora favoreçam a apresentação das feições em mais detalhes, há uma perda de contexto sobre a área geográfica. A informação de contexto espacial é importante para o estágio de confiança (BURNETT, 1998), pois auxilia o motorista a se manter orientado na rota enquanto navega pela mesma (LEE et al., 2008).

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho avaliou a influência do gênero do motorista na demanda visual por mapas exibidos em diferentes escalas em sistema de navegação e guia de rota em automóvel. As questões investigadas foram respondidas por meio da análise de um conjunto de variáveis importantes no processo de determinação da demanda visual.

Para os casos estudados, conclui-se que motoristas de distintos gêneros apresentam diferenças em desempenho ao se prepararem para a realização da manobra, dependendo do tipo de manobra a ser realizada e da escala do mapa. Este trabalho confirma os relatos da literatura a respeito de que as mulheres sentem maior ansiedade espacial e possuem menor habilidade espacial que os homens. Tais evidências foram constatadas em termos do aumento do número de olhadas que as mulheres realizaram para o mapa, bem como em termos da soma de tempo que permaneceram com os olhos fora da via. O fato dos homens terem maior habilidade

espacial e se sentirem menos ansiosos durante a realização de tarefas visuo-espacial explica o fenômeno de se sentirem mais confiantes ao interagirem com mapas para navegarem em áreas pouco ou não familiares.

Conclui-se que apresentar as instruções de navegação em mapas mais generalizados (ex.: 1:6.000) contribui para a redução da demanda visual do motorista, em razão do mapa oferecer maior contexto espacial. A maior sensação de contexto, possivelmente, aumenta a confiança do motorista na tarefa de navegação apoiada por SINGRA. Conclui-se também que o tipo de manobra é um fator determinante para o desempenho do motorista no processo de leitura do mapa. Ambos, homens e mulheres, apresentaram aumento na demanda visual em tarefas tácticas relacionadas a manobras complexas, independentemente da escala de representação.

Na avaliação do desempenho entre motoristas de um mesmo grupo, há evidências para se concluir que os mapas exibidos nas escalas duas diferentes escalas, 1:3.000 e 1:6.000, são eficientes para auxiliar motoristas homens e motoristas mulheres. Houve variação de desempenho para ambos os grupos de motoristas não somente em função da variável de demanda visual analisada, mas também do tipo de manobra realizada.

Ainda que, para os casos estudados, os mapas se apresentaram eficientes, em termos de demanda visual, para auxiliar motoristas de diferentes grupos, recomenda-se avaliar as interfaces em termos de eficácia e satisfação do usuário. Estas são outras duas classes de medidas necessárias na avaliação da usabilidade de uma interface. Recomenda-se também avaliar a usabilidade do mapa para a mudança automática das escalas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BINFENG, L.; ZHU, K.; ZHANG, W.; WU, A.; ZHANG, X. A comparative study of two wayfinding aids for simulated driving tasks – single-scale and dual-scale GPS aids. *Behaviour & Information Technology*, p.1-11. 2012.
- BURNETT, G. E. "Turn right at the King's Head": Drivers' requirements for route guidance information. *PhD Thesis, Loughborough University, UK*. 1998.
- CHING-TORNG,L.; HSIN-CHIEH, W.; TING-YEN, C. Effects of e-map format and sub-windows on driving performance and glance behavior when using an in-vehicle navigation system. *International Journal of Industrial Ergonomics*. v. 40, p. 330–336. 2010.
- COLUCCIA, E.; LOUSE, G. Gender differences in spatial orientation: A review. *Journal of Environmental Psychology*. v. 24, p. 329–340. 2004.
- COLUCCIA, E.; IOSUE, G.; BRANDIMONTE, M. A. The relationship between map drawing and spatial orientation abilities: A study of gender differences. *Journal of Environmental Psychology*. v. 27, n. 2, p. 135-144. 2007.
- CONOVER, W. J. *Practical nonparametric statistics*. New York: J. Wiley, 1999.

- DABBS, J. M.; CHANG, E-LEE.; STRONG, R. A.; MILUN, R. Spatial Ability, Navigation Strategy, and Geographic Knowledge Among Men and Women. *Evolution and Human Behavior*, v. 19, n. 2, p.88-98. 1998.
- DILLEMUTH, J.; GOLDSBERRY, K.; CLARKE, K. C. Choosing the scale and extent of maps for navigation with mobile computing systems. *Journal of Location Based Services*. v. 1, n. 1, p. 46-61. 2007.
- FLEMING, A. 2013 – *The Year of the Woman Car Buyer: Capture This Powerful & Ever-Growing*. Disponível em <[http://www. autoremarketing.com/trends](http://www.autoremarketing.com/trends)>. Acesso em 19 jul. 2014.
- FREE PRESS, 2013. *The female car buyer – She’s invisible – but she buys 30 million cars a year*. Disponível em <<http://she-economy.com/>> report. Acesso em 09 jul. 2014.
- GREEN, P. LEVISON, W.; PAELKE, G.; SERAFIN, C. Preliminary human factors design guidelines for driver information systems. *Technical report UMTRI*, Ann Arbor, MI, The University of Michigan Transportation Research Institute. 1995.
- HEGARTY, M.; WALLER, H. A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence*. v. 32, p. 175-191. 2004.
- HO, A.; LI, Z. Design of Dynamic Map for Land Vehicle Navigation. *The Cartographic Journal*. v. 41, n. 3, p. 265–270. 2004.
- HOOVEN C. A.; CHABRIS C. F.; ELLISON, P. T.; KOSSLYN, S. M. The relationship of male testosterone to components of mental rotation. *Neuropsychologia* v. 42 p. 782–790. 2004.
- KABER, D. B.; LIANG, Y.; ZHANG, Y.; ROGERS, M. L.; GANGAKHEDKAR, S. Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior. *Transportation Research Part F*. v. 15, p.491-501. 2012.
- KLAUER, S. G.; DINGUS, T. A.; NEALE, V. L.; SUDWEEKS, J. D. The Impact of Driver Inattention on Near-Crash/Crash Risk: An Analysis Using the 100-Car Naturalistic Driving Study Data. *Technical report* National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA. Washington, DC, 2006. Disponível em <[http://www.nhtsa.gov/ Research/](http://www.nhtsa.gov/Research/)>. Acesso em 03 jul. 2014
- KOZLOSWKI, L. T.; BRYANT, K. J. Sense of direction, spatial orientation, and cognitive maps. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, v. 3, n. 4, p. 590–598, 1977.
- LABIALE, G. Visual search and preferences concerning different types of guidance displays. *Behaviour & Information Technology*. London: Taylor & Francis. n. 3, v. 20, p.149-158. 2001.
- LAIRD EVANS, J., STEVEN, A. Measures of graphical complexity for navigation and route guidance display. *Displays*, v.17, n.2, p.89-93, 1997.
- LAVIE, T.; ORON-GILAD, T.; MEYER, J. Aesthetics and usability of in-vehicle navigation displays. *International Journal of Human-Computer Studies*. v. 69, p. 80–99. 2011.

- LAVIE, T.; ORON-GILAD, T. Perceptions of electronic navigation displays. *Behaviour & Information Technology*. v. 32, n. 8, p. 800–823. 2013.
- LAWTON, C. A. Gender Differences in Way-Finding Strategies: Relationship to Spatial Ability and Spatial Anxiety. *Sex Roles*. v.30, n. 11/12, p.765-779, 1994.
- LEE, J.; FORLIZZI, J.; HUDSON, S. Iterative design of MOVE: A situationally appropriate vehicle navigation system. *International Journal of Human-Computer Studies*. v. 66, p.198–215. 2008.
- MARQUES, A. P. S.; DECANINI, M. M. S.; PUGLIESI, E. A. Sistema de Navegação e Guia de Rota áudio-dinâmico com múltiplas escalas automáticas. *Revista Brasileira de Cartografia*. v. 1, n. 64, p. 57-68. 2012.
- MONTELLO, D. R.; LOVELACE, K. L.; GOLLEDGE, R. G.; SELF, C. M. Sex-related differences and similarities in geographic and environmental spatial abilities. *Annals of the Association of American geographers*. v. 89. n. 3, p.515–534. 1999.
- OOMS, K.; DE MEYER, P.; FACK, V.; ASSCHE, E. V.; WITLOX, F. Interpreting maps through the eyes of expert and novice users. *International Journal of Geographical Information Science*. v. 26, n. 10, p. 1773-1788, 2012.
- PEI-CHUN, L.; SHANG-I, C. The effects of gender differences on the usability of automotive on-board navigation systems – A comparison of 2D and 3D display. *Transportation Research Part F*. v.19, p.40-51, 2013.
- POOLE, A.; BALL, L. Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Current Status and Future. In: GHAOUI, C. *Encyclopedia of Human-Computer Interaction*. Pennsylvania, USA: Idea Group, 2005.
- PUGLIESI, E. A.; DECANINI, M. M. S.; RAMOS, A. P. M.; TSUCHIYA, I. Métodos para Avaliação da Usabilidade de Sistemas de Navegação e Guia de Rota. *Revista Brasileira de Cartografia*. v. 5, n. 65, p. 571-589. 2013.
- PUGLIESI, E. A.; DECANINI, M. M. S.; TACHIBANA, V. M. Evaluation of the Cartographic Communication Performance of a Route Guidance and Navigation System. *Cartography and Geographic Information Science*. v. 36, n. 2, p.193-207. 2009.
- RAMOS, A. P. M.; PUGLIESI, E. A.; DECANINI, M. M. S.; OLIVEIRA, R. F. Escalas dos mapas de sistemas de guia de rota comercial. *Revista Brasileira de Cartografia*. v.1, n. 66. p.195-207. 2014a.
- RAMOS, A. P. M.; PUGLIESI, E. A.; DECANINI, M. M. S. TACHIBANA, V. M. Estudo preliminar da preferência de cor para rota e seta de manobra em mapas de sistemas de guia de rota. *Boletim de Ciências Geodésicas*. v. 20, n. 2, p. 317-333. 2014b.
- RAMOS, A.P.M.; PUGLIESI, E.A.; DECANINI, M.M.S.; OLIVEIRA, R.F.; TACHIBANA, V.M. Avaliação de erros navegacionais em sistema de navegação e guia de rota em automóvel com mapas em diferentes escalas. In: XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia 2014c, Gramado, **Anais...**Gramado: FAURGS, 2014. Disponível em

- <<http://www.cartografia.org.br.html>> Acesso em 10 out 2014.
- SHELEIBY, M.; MALEK, M.R.; ALESHEIKH. Automatic Map Scaling in Car Navigation Systems Using Context-aware Computing. *World Applied Sciences Journal*. v. 3, p. 101-106. 2008.
- SLOCUM, T. A.; BLOK, C.; JIANG, B.; KOUSSOULAKOU, A.; MONTELLO, D. R.; FUHRMANN, S.; HEDLEY, N. R. *Cognitive and Usability Issues in Geovisualization. Cartography and Geographic Information Science*. v. 28, p.61-75, 2001.
- TSIMHONI, O.; YOO, W.; GREEN, P. Effects of Workload and Task Complexity on Driving and Task Performance for In-Vehicle displays as Assessed by visual occlusion. *Technical report UMTRI-99-37*, Ann Arbor, MI, The University of Michigan Transportation Research Institute. 1999.
- TSIMHONI, O.; GREEN, P. Visual demand of driving and the execution of display-intensive in-vehicle tasks. *In Proceedings of the human factors and ergonomics society 45th annual meeting*, 2001, Santa Monica, California, USA. p. 1586-1590.
- UANG, S. T.; HWANG, S. L. Effects on driving behavior of congestion information and of scale of in-vehicle navigation systems. *Transportation Research Part F*. v. 1, n.11, p.423-438. 2003.
- WAKABAYASHI, Y. Gender-related differences in the map use of in-vehicle navigation systems. *In Proceedings of the International Cartographic Conference*, 2011, Paris, France. p. 1-14.
- WILKENING, J.; FABRIKANT, S. I. The effect of gender and spatial abilities on map use preferences and performance in road selection tasks. *In Proceedings of the International Cartographic Conference*, 2011, Paris, France. p. 232-242.
- WITTMANN, M.; KISS, M.; GUGG, P.; STEFFEN, A.; FINK, M.; PÖPPEL, E.; KAMIYA, H. Effects of display position of a visual in-vehicle task on simulated driving. *Applied Ergonomics*. v. 37, p. 187-199. 2006.
- WU, C.; ZHAO, G.; LIN, B.; LEE, J. Navigating a car in an unfamiliar country using an internet map: effects of street language formats, map orientation consistency, and gender on driver performance, workload and multitasking strategy. *Behaviour & Information Technology*. v. 32, n. 5, p. 425-437. 2013.
- WU, A.; ZHANG, X. Identifying Proper Scales on Digital Maps for In-Vehicle Navigation Systems. *In: HCI Part III*, San Diego, CA, 2009, p. 262-270 (Recebido em agosto de 2014. Aceito em novembro de 2014).

PROPOSTA DE INTERSECÇÃO DE LINHAS GEODÉSICAS SOBRE A SUPERFÍCIE ESFÉRICA E SOBRE O ELIPSÓIDE DE REVOLUÇÃO

Motion for intersection geodesic lines on spherical surface and on the revolution ellipsoid

MARCOS AURÉLIO BASSO¹
LUIZ FERNANDO MACEDO MORESCKI JUNIOR¹
ALYNE RAMINELLI SIGUEL²
CARLOS AURÉLIO NADAL¹

¹ Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Centro Politécnico – Curitiba – PR - Brasil

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba – PR - Brasil

marcosbasso@ufpr.br; morescki@ufpr.br; alynesiguel@utfpr.edu.br;
cnadal@ufpr.br.

RESUMO

A Lei 8.617 de 1993 define a Zona Econômica Exclusiva como uma faixa de até duzentas milhas náuticas ao longo do mar territorial, na qual os recursos existentes podem ser explorados, rendendo royalties aos estados que confrontam com essas áreas. A demarcação das águas territoriais será efetivada através da intersecção entre duas linhas geodésicas. Neste trabalho, propõe-se uma solução para o problema da intersecção de linhas geodésicas nas superfícies esférica e elipsoidal. Inicialmente, fundamentaram-se os cálculos na trigonometria esférica, fornecendo resultados preliminares, que servem como uma primeira aproximação. Na sequência, propôs-se um método computacional recursivo, baseado nas formulações de Vincenty, onde são realizadas discretizações de azimutes de pequenos segmentos de arco, servindo como aproximação à intersecção por meio da obtenção do lugar geométrico do ponto oriundo da intersecção dos últimos segmentos obtidos.

Palavras-chave: Linha Geodésica; Trigonometria Esférica; Formulação de Vincenty.

ABSTRACT

According to the Brazilian law number 8,617 of 1993, the Exclusive Economic Zone is defined as a range of up to two hundred nautical miles along the territorial sea in which existing resources can be exploited, yielding royalties to states confronting with these areas. In some cases, to comply what is provided by the applicable law, the demarcation of territorial waters may be established through the intersection of two geodesic lines. The goal of this study proposes a solution to the intersection problem of geodesic lines in the spherical and ellipsoidal surfaces. At first, the calculations were based on spherical trigonometry, providing preliminary results which work as a first approximation. Next, a recursive computation method based on Vincenty's formulation is proposed, which are performed in azimuth discretization of small arc segments, serving as an approach to the intersection by the geometric local of the encounter between the last segments obtained.

Keywords: Geodesic Line; Spherical Trigonometry; Vincenty's Formulation.

1. INTRODUÇÃO

A definição das divisas entre estados e países constitui um problema atual e de grande relevância para a sociedade. A intersecção entre linhas geodésicas é objeto de estudos de vários geodestas, como Baeschlin (1948) e Kneissl (1958), além de trabalhos mais recentes de Heitz (1988), Sjöberg (2002) e Grafarend (2006), que se baseou no método Newton-Raphson para o cálculo da intersecção.

A Lei federal nº 8.617 de 1993 preconiza a determinação da intersecção entre linhas geodésicas perpendiculares a costa, para definir as divisas territoriais entre estados. O uso econômico mais relevante deste problema diz respeito à distribuição de direitos referentes à extração do petróleo em Zonas Econômicas Exclusivas (ZEE). No entanto, a distribuição de royalties para os estados é afetada diretamente por este fato. Há também a possibilidade de exploração de recursos energéticos na região do pré-sal, que acaba por promover novamente uma discussão sobre como executar a divisão e a demarcação das águas territoriais.

Para efeitos de indenização sobre os recursos extraídos da Plataforma Continental, consideram-se confrontantes com poços produtores os estados, territórios e municípios contíguos à área marítima delimitada pelas linhas de projeção dos respectivos limites territoriais até a linha de limite da Plataforma Continental, onde estiverem situados os poços de exploração (Lei nº 7.525/1986).

Visto tal importância econômica, fica atribuído ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de acordo com o artigo nono da Lei nº 7.525 de 22 de julho de 1986 – traçar as linhas de projeção dos limites territoriais dos estados, territórios e municípios confrontantes, segundo a linha geodésica ortogonal à costa

ou segundo o paralelo até o ponto de sua intersecção com os limites da Plataforma Continental.

Os critérios para a definição dos limites são:

I - linha geodésica ortogonal à costa para indicação dos estados onde se localizam os municípios confrontantes; e

II - sequência da projeção além da linha geodésica ortogonal à costa, segundo o paralelo para a definição dos municípios confrontantes no território de cada estado.

Segundo a Lei do Mar, Lei nº 8.617, uma Lei federal de 4 de janeiro de 1993, a Plataforma Continental se estende além do Mar Territorial até o bordo exterior da margem continental, ou, até duzentas milhas a contar das linhas de base.

Esta Lei define também, a Zona Econômica Exclusiva brasileira, que compreende uma faixa que se estende das doze às duzentas milhas marítimas, contadas desde as linhas de base que servem para medir a largura do Mar Territorial. Em algumas situações, a Plataforma Continental ultrapassa essa distância, estendendo a propriedade econômica do estado até trezentos e cinquenta milhas marítimas. No entanto, neste artigo, considera-se apenas a distância de duzentas milhas náuticas nos cálculos efetuados. Os pontos apropriados para o traçado das linhas de base retas ao longo da costa brasileira são dispostos no Decreto 4.983, de 10 de fevereiro de 2004.

Em alguns casos, para o cumprimento daquilo que se encontra disposto na legislação vigente, a demarcação das águas territoriais será estabelecida com base na intersecção entre duas linhas geodésicas. Portanto, este trabalho propõe uma solução onde, conhecidos dois pontos na superfície física da terra, denominados de A e B , deseja-se conhecer o ponto de intersecção P , que satisfaçam a condição de comprimento de 200 milhas náuticas (200') das linhas geodésicas que partem do ponto A até o P , e do ponto B até o ponto P . Para isso, deverão ser determinados os dois azimutes AAP e ABP que satisfaçam esta condição.

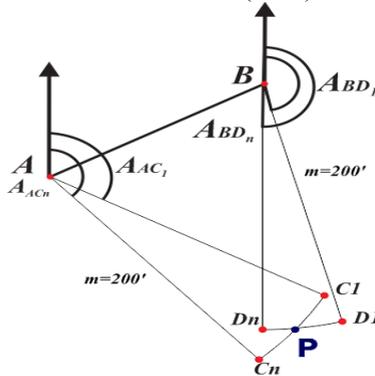
Este trabalho propõe, portanto, o desenvolvimento de um algoritmo recursivo, que discretiza em pequenos seguimentos de arcos os azimutes. Baseando-se nas fórmulas diretas de Vincenty, são determinadas diferentes coordenadas para os pontos geodésicos auxiliares denominados de C e D , com o comprimento da geodésica fixada em 200 milhas náuticas. A cada novo valor de azimutes, novos valores de coordenadas dos pontos C e D são definidos. O programa só será encerrado quando as coordenadas dos pontos C e D forem similares. Para reduzir os espaço de busca foi calculado primeiramente os azimutes sobre a superfície esférica.

A metodologia proposta foi testada na costa paranaense, utilizando dois pontos que fazem limites como estado de Santa Catarina e com o estado de São Paulo e foram realizados experimentos com diferentes resoluções de discretização.

2. INTERSECÇÃO ENTRE DUAS GEODÉSICAS

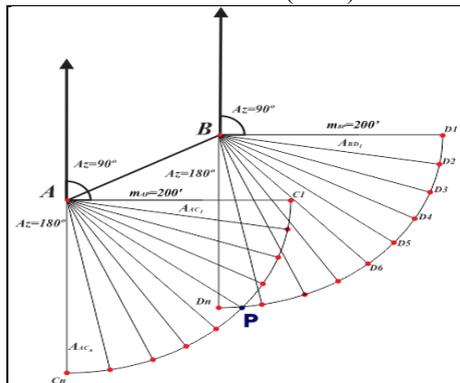
A Figura 1 mostra os seguintes elementos, os pontos A e B , com suas coordenadas geodésicas conhecidas sobre a superfície física da Terra, e as distâncias m_{AP} e m_{BP} que estão fixadas em 200'. Deseja-se, portanto, determinar em qual lugar geométrico ocorre a intersecção entre as duas geodésicas (P), para isso deve-se computar os dois azimutes A_{AP} e A_{BP} .

Figura 1 - Intersecção entre duas geodésicas .
 Fonte: O Autor (2014).



A proposta, portanto, para o cálculo dos azimutes, é discretizá-los em pequenos seguimentos de arco, para isso, é utilizado dois pontos geodésicos auxiliares C e D . Para cada novo valor de azimutes novos valores para as coordenadas dos pontos auxiliares são estabelecidos e a hipótese de ponto P é definida quando as coordenadas dos pontos C e D são similares, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Determinação do lugar geométrico do ponto P .
 Fonte: O Autor (2014).



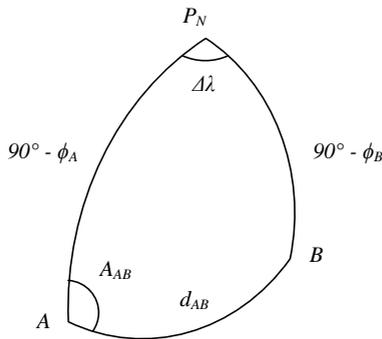
Na Figura 2, observa-se a discretização dos azimutes ente 90° e 180° , até encontrar os azimutes que satisfaçam a condição de $200'$ para ambas as geodésicas.

Conforme um menor incremento na discretização dos azimutes, uma melhor aproximação é definida para o cálculo da intersecção do ponto P , mas isso eleva o tempo de processamento e prejudica a performance do algoritmo, caso a discretização seja de 1 segundo ($1''$) do azimute. Para otimizar este processamento, foi realizado o cálculo da intersecção na superfície esférica entre arcos de circunferência máxima, definindo assim, os azimutes A_{AP} e A_{BP} como uma primeira aproximação, e posteriormente o refinamento destes valores na superfície do elipsóide. Na próxima seção, mostra-se o cálculo da intersecção do ponto P na superfície esférica.

2.1 Intersecção Entre Arcos de Circunferência Máxima

São definidos, na Figura 3, os lados e ângulos do triângulo esférico, denominado de triângulo de posição, AP_NB , que tem como vértices o Pólo Norte geográfico e dois pontos da esfera (A e B).

Figura 3 – Triângulo de posição AP_NB .
Fonte: O Autor (2014).



Por convenção, são adotadas latitudes (ϕ) positivas no hemisfério norte e longitudes positivas (λ) a leste do meridiano de *Greenwich*. A diferença entre longitudes é obtida pela Equação 1.

$$\Delta\lambda = \lambda_A - \lambda_B \quad (1)$$

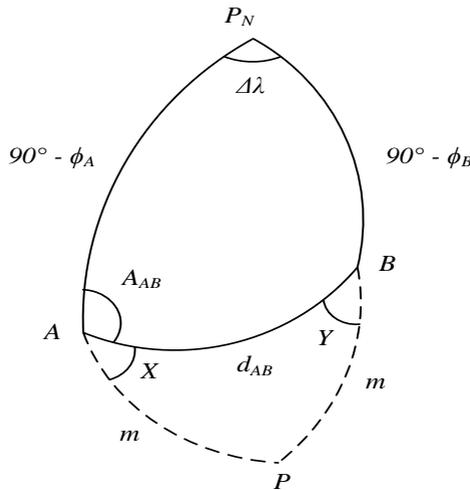
Com a aplicação da Lei dos Cossenos para os lados do triângulo de posição, Gemael (1981), determinam-se os valores do lado d_{AB} e do azimute da direção de A para B, ângulo A_{AB} , como mostram as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\cos d_{AB} = \cos(90^\circ - \varphi_A) \cos(90^\circ - \varphi_B) + \sin(90^\circ - \varphi_A) \sin(90^\circ - \varphi_B) \cos \Delta\lambda \quad (2)$$

$$\cos A_{AB} = \frac{\cos(90^\circ - \varphi_B) - \cos(90^\circ - \varphi_A) \cos d_{AB}}{\sin(90^\circ - \varphi_A) \sin d_{AB}} \quad (3)$$

A Figura 4 mostra o ponto P , oriundo da intersecção entre dois arcos de circunferência máxima que partem dos pontos A e B . Neste caso, adotar-se-ão os comprimentos AP e BP de 200 milhas náuticas, representados por m .

Figura 4 – Triângulo de posição $AP_N B$ e triângulo esférico APB .
 Fonte: O Autor (2014).



Aplicando-se a Lei dos Cossenos para os lados do triângulo esférico APB , calcula-se o ângulo X , congruente ao ângulo Y , utilizando-se a Equação 4.

$$\cos X = \frac{\cos m(1 - \cos d_{AB})}{\sin m \sin d_{AB}} \quad (4)$$

Com a Equação 5, calcula-se o azimute de A para P :

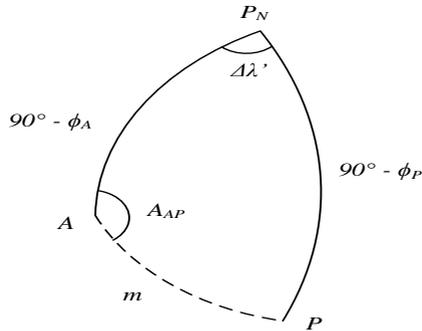
$$A_{AP} = X + A_{AB} \quad (5)$$

Aplicando-se a Lei dos Cossenos aos lados do triângulo esférico $AP_N P$, Figura 5, obtém-se a latitude φ_P do ponto de intersecção P , Equação 6.

$$\cos(90^\circ - \varphi_P) = \cos(90^\circ - \varphi_A) \cos m + \sin(90^\circ - \varphi_A) \sin m \cos A_{AP} \quad (6)$$

Figura 5 – Triângulo de posição AP_NP .

Fonte: O Autor (2014).



Considerando ainda o triângulo esférico AP_NP e utilizando novamente a Lei dos Cossenos, determina-se o valor de $\Delta\lambda'$, conforme a Equação 7.

$$\cos \Delta\lambda' = \frac{\cos m - \cos(90^\circ - \varphi_A) \cos(90^\circ - \varphi_P)}{\sin(90^\circ - \varphi_A) \sin(90^\circ - \varphi_P)} \quad (7)$$

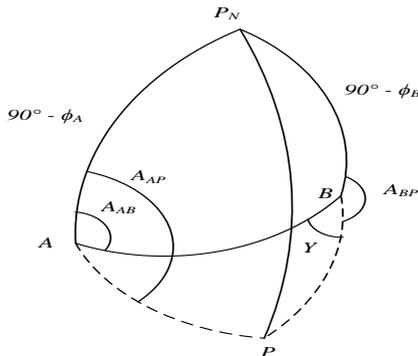
O valor da longitude do ponto de intersecção, λ_P , pode ser calculado pela Equação 8.

$$\Delta\lambda' = \lambda_A - \lambda_P \quad (8)$$

Para o cálculo dos azimutes de direções que serão utilizados como primeiras aproximações para a discretização computacional, utilizam-se fórmulas da trigonometria esférica. A Figura 6, ilustra os triângulos AP_NP , PP_NB e APB e os azimutes das direções a serem utilizadas.

Figura 6 – Triângulos esféricos AP_NP , PP_NB e APB .

Fonte: O Autor (2014).



O cálculo do azimute da direção do ponto B para o ponto P pode ser feito aplicando-se a Lei dos Senos ao triângulo AP_NB para o cálculo do ângulo B . Em seguida, determina-se o azimute A_{BP} como sendo o replemento da soma do ângulo B com o ângulo Y .

2.2 Transporte de Coordenadas na Superfície do Elipsóide

O transporte de coordenadas é um procedimento básico em Geodésia para a determinação da posição de pontos na superfície do elipsóide. Divide-se em dois problemas básicos, o problema direto, onde dada a coordenada de um ponto (φ_1, λ_1) , uma distância (m) e um azimute recíproco (A), determinam-se as coordenadas de outro ponto (φ_2, λ_2) . E o problema inverso ou indireto, onde dado as coordenadas de dois pontos (φ_1, λ_1) e (φ_2, λ_2) , determinam-se a sua distância (m_{12}), como também o seu azimute (A_{12}).

Os denominados problemas direto e inverso da Geodésia foram solucionados historicamente por vários geodestas que desenvolveram fórmulas para a sua solução. Estas formulações podem ser algébricas com soluções imediatas (SODANO,1965), ou iterativas, resolvidas por meio de recursos computacionais (KIVIOJA,1971), (VINCENTY,1975) e (SAITO,1979). Para este experimento foram implementadas as consagradas fórmulas de Vincenty.

A formulação dos problemas direto e inverso de Vincenty pode ser encontrado em toda sua plenitude em Vincenty (1975). Suas fórmulas foram testadas e verificadas com erros menores de 0,115 mm, considerando a distância de 18000 km em todos os casos testados (THOMAS & FEATHERSTONE, 2005).

Em trabalho de GALO et al. (2003), foram empregadas as fórmulas de Vincenty para a discretização da geodésica, em diferentes resoluções, no cálculo de áreas de polígonos sobre o elipsóide utilizando projeções equivalentes. Neste caso, quanto menor o incremento da discretização da geodésica, mais próximo do valor verdadeiro da área era atingido.

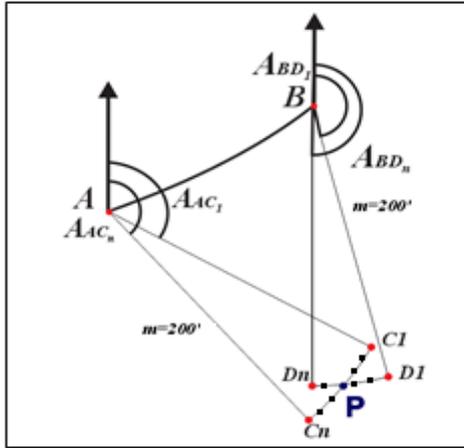
3. METODOLOGIA

Nesta seção, é discutida a metodologia empregada para determinar o ponto de interseção entre dois pontos sob o elipsóide. Conforme mencionado anteriormente, a metodologia consiste em, inicialmente, determinar o ponto de interseção P com relação à superfície esférica, e utilizar os azimutes A_{AP} e A_{BP} determinados como a primeira aproximação na superfície do elipsóide.

3.1 Restringindo o Espaço de Busca

Na Figura 7, apresenta-se o espaço de busca reduzido através dos azimutes identificados na superfície da esfera. É possível observar também os elementos A_{AC_1} e A_{AC_n} , além de A_{BD_1} e A_{BD_n} .

Figura 7 – Restringindo o espaço de busca.
 Fonte: O Autor (2014).



A determinação de tais elementos é realizada em função dos azimutes A_{AP} e A_{BP} na superfície da esfera, e sua determinação se faz da seguinte forma:

- seguimento de A para P:

$$A_{AC_1} = Trunc(A_{AP}) - 1^\circ \tag{9}$$

$$A_{AC_n} = Trunc(A_{AP}) + 1^\circ \tag{10}$$

- seguimento de B para P:

$$A_{BD_1} = Trunc(A_{BP}) - 1^\circ \tag{11}$$

$$A_{BD_n} = Trunc(A_{BP}) + 1^\circ \tag{12}$$

Portanto, estes elementos irão controlar o espaço de busca da intersecção, aplicando as fórmulas diretas de Vincenty através de um incremento angular denominado como *passo*, discretizando o valor de A_{AC_1} até A_{AC_n} e de A_{BD_1} até A_{BD_n} . Em cada discretização de A_{AC_1} até A_{AC_n} têm-se, portanto, novos valores de coordenadas do ponto $C = \{(\varphi_{C_1}, \lambda_{C_1}); (\varphi_{C_2}, \lambda_{C_2}); (\varphi_{C_i}, \lambda_{C_i}); \dots; (\varphi_{C_n}, \lambda_{C_n})\}$ com $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$. Discretizando de A_{BD_1} até A_{BD_n} obtém-se um conjunto de valores de coordenadas $D = \{(\varphi_{D_1}, \lambda_{D_1}); (\varphi_{D_2}, \lambda_{D_2}); (\varphi_{D_i}, \lambda_{D_i}); \dots; (\varphi_{D_n}, \lambda_{D_n})\}$, $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

Através deste conjunto de pontos C e D será feita uma busca para verificar quais pares de seguimento de geodésica se cruzam ou se tocam. Com base nestes

dois seguimentos é possível localizar um ponto de latitude e longitude em comum no conjunto de pontos C e D , e desta forma, encontra-se uma hipótese de ponto P .

3.2 Definindo a Hipótese de Intersecção

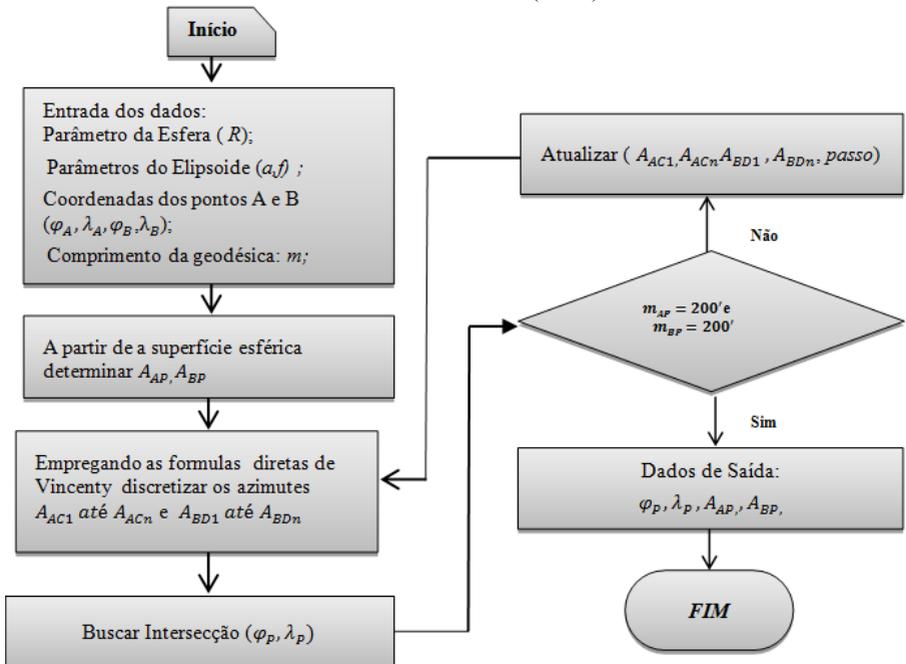
Para definir a hipótese de intersecção P é realizado um teste para verificar as distâncias de A para P e de B até P através das fórmulas inversas de Vincenty. Caso estas distâncias não estejam em conformidade, ou seja, que suas geodésicas não sejam de 200 milhas náuticas dentro de uma margem de erro igual a 0,010 m é realizado um novo processamento.

Neste novo processamento, os quatro pontos mais próximos da hipótese de intersecção P assumirão os novos valores de A_{AC_1} e A_{AC_n} e de A_{BD_1} e A_{BD_n} , e um novo valor de *passo* é empregado. De forma recursiva este processo se repete até que o valor do *passo* seja de apenas 1 segundo de arco. Assim, retorna-se o valor mais preciso possível dos azimutes que satisfaçam a condição de 200 milhas náuticas das geodésicas e a coordenada do ponto P .

A Figura 8 apresenta um fluxograma sintetizando todas as etapas do processamento. Para a implementação computacional foi desenvolvido um código em ambiente de programação *Lazarus* e a componente *TChart* para visualização dos dados.

Figura 8 – Fluxograma ilustrando as etapas de processamento.

Fonte: O Autor (2014).



Para garantir que haja intersecção o comprimento da geodésica entre o ponto A até B deverá ser menor que o dobro da distância de 200 milhas náuticas.

4. EXPERIMENTOS

Para avaliação da metodologia proposta foram utilizados dois pontos da linha de costa, o ponto A localizado entre a divisa da costa paranaense, e o ponto B, localizado próximo à divisa da costa dos estados do Paraná e São Paulo. As coordenadas geodésicas dos respectivos pontos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas Geodésicas dos pontos A e B.

Ponto	Latitude	Longitude
A	25° 50' 27" S	48° 24' 18" W
B	23° 57' 45" S	45° 14' 03" W

O valor do raio da esfera empregado foi de 6.372.000 m, e os parâmetros do elipsóide utilizado (GRS-80) são definidos pela IUAG (*International Union of Geodesy and Geophysics*), como sendo: $a=6378137,000$ m (semi-eixo maior) e $f=1/298,257223563$ (achatamento).

5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

No cálculo da intersecção na superfície da esfera, foi encontrado o seguinte valor para o ponto P: $\varphi_p = 27^\circ 17' 30,02''S$, $\lambda_p = 45^\circ 02' 58,04''W$; e os respectivos azimutes $A_{AP}=116^\circ 35' 55,05''$; $A_{BP}=177^\circ 20' 31,09''$). Conforme apresentado na metodologia, têm-se os seguintes valores para A_{AC_1} (115°); A_{AC_n} (117°); e de A_{BD_1} (176°); A_{BD_n} (178°). Sendo estes os azimutes que irão limitar o espaço de busca.

Dentro do aplicativo estão estabelecidos os valores de *passo* que são de $10'$, $5'$, $30''$, $10''$, $5''$ e $1''$. As coordenadas do ponto de intersecção P, quando determinadas, são consideradas isentas de erro. Portanto, este erro se propagará no comprimento da geodésica. Na Tabela 2 mostra-se os erros absolutos que cada diferente resolução de discretização apresenta.

Tabela 2- Diferente resoluções na discretização dos azimutes.

<i>Passo</i>	Erro Esperado (m)	Erro Esperado ppm
10'	1078,669	2912,1733
5'	539,535	1456,6280
1'	107,867	291,2176
30''	55,934	151,0097
10''	17,978	48,5367
5''	8,989	24,2684
1''	1,798	4,8542

Conforme a Tabela 2, é possível verificar que quanto menor for o valor do *passo* menor será o erro na determinação da coordenada do ponto P, e consequentemente, o valor do comprimento das geodésicas m_{AP} e m_{BP} . Observa-se também que o erro absoluto da geodésica a 1'' de arco, com distância de 200 milhas náuticas, atinge um erro de 1.798 m, podendo ser considerado, do ponto de vista prático, como um seguimento de reta.

A Tabela 3 apresenta o resultado do comprimento da geodésica m_{AP} , calculado com as diferentes resoluções de discretização, verificadas através das fórmulas inversas de Vincenty, com base no ponto de origem A para a determinação do ponto P.

Tabela 3– Erro em distância entre o ponto A até P

<i>Passo</i>	m_{AP} (m)	Erro (m)	Erro (ppm)
10'	370399,932	0,068	-0,184
5'	370399,948	0,052	-0,140
1'	370399,970	0,030	-0,081
30''	370399,973	0,027	-0,073
10''	370399,977	0,023	-0,062
5''	370399,980	0,020	-0,054
1''	370400,008	0,008	0,022

Observa-se na Tabela 4, que o valor da distância atingiu no valor de passo igual a 1'', a precisão estipulada, ou seja, inferior a 0,01 m. É possível visualizar também o resultado do comprimento da geodésica m_{BP} .

Tabela 4 – Erro em distância entre o ponto B até P.

<i>Passo</i>	m_{BP} (m)	Erro (m)	Erro (ppm)
10'	370399,839	0,068	-0,435
5'	370399,861	0,052	-0,375
1'	370399,900	0,030	-0,270
30''	370399,946	0,027	-0,146
10''	370399,948	0,020	-0,140
5''	370399,948	0,020	-0,140
1''	370400,004	0,008	0,011

Na Tabela 5, podem ser verificadas as coordenadas de latitude e longitude (φ_P λ_P) do ponto de intersecção P, calculadas através das distâncias apresentadas e calculadas através das fórmulas inversas de Vincenty, utilizando como parâmetros as coordenadas do ponto A, B.

Tabela 5 – Coordenadas do ponto P.

<i>Passo</i>	φ_P	λ_P
10'	-27° 18'08,2763"	-45°03'39,6301"
5'	-27° 18'08,2798"	-45°03'39,6300"
1'	-27° 18'08,2811"	-45°03'39,6302"
30''	-27° 18'08,28215"	-45° 03'39,6304"
10''	-27° 18'08,28218"	-45° 03'39,6305"
5''	-27° 18'08,28219"	-45°03'39,6308"
1''	-27° 18'08,2824"	-45°03' 39,6306"

As fórmulas inversas de Vincenty, além de retornar os valores das distâncias m_{AB} e m_{BP} , também retornam os valores dos azimutes. Os seus respectivos valores são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores dos Azimutes.

<i>Passo</i>	A_{AP}	A_{BP}
10'	116° 39' 45,52622"	177° 20' 46,32051"
5'	116° 39' 45,27669"	177° 20' 46,17367"
1'	116° 39' 45,17997"	177° 20' 46,11048"
30''	116° 39' 45,20515"	177° 20' 46,11444"
10''	116° 39' 45,20508"	177° 20' 46,11414"
5''	116° 39' 45,20516"	177° 20' 46,11416"
1''	116° 39' 45,20956"	177° 20' 46,11461"

Conforme a Tabela 6, considerando-se que partisse do ponto A uma geodésica com 200 milhas náuticas e azimute igual a 116°39'45,20956", e do ponto B uma geodésica com o mesmo comprimento, e com azimute igual a 177°20'46,11461, ambas as linhas geodésicas se interceptariam no ponto P com coordenadas de -27°18'08,2824" de latitude e -45°03'39,6306" de longitude.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo principal obter o ponto de intersecção entre duas linhas geodésicas, garantindo uma distância de duzentas milhas náuticas da costa brasileira. Este comprimento corresponde à extensão que define a Zona Econômica Exclusiva, onde tal importância econômica acaba por resultar no interesse dos estados em delimitar suas correspondentes áreas marítimas, que dão direito a receber o pagamento de royalties. Na busca da definição de tais áreas, surgiu o interesse em buscar uma solução para este problema.

Primeiramente, foi realizada a intersecção entre as linhas geodésicas na superfície esférica, baseando-se em rígidas fórmulas da trigonometria. O resultado obtido serve como aproximação a intersecção na superfície elipsoidal, e os azimutes

calculados propiciaram um menor esforço computacional quando da aplicação do método utilizado para a intersecção na superfície elipsoidal.

O cálculo da intersecção das linhas geodésicas na superfície elipsoidal foi realizado por meio de um algoritmo computacional baseado nas formulações de Vincenty. A discretização dos azimutes iniciais, obtidos pela trigonometria esférica, propiciou um menor esforço computacional, pois reduz o espaço de busca para a hipótese de intersecção, o que permitiu a realização de análises com diferentes graus de discretização.

A intersecção entre duas linhas geodésicas foi obtida por dois métodos distintos na superfície elipsoidal e esférica. Conforme os resultados encontrados, considera-se que as soluções são satisfatórias com precisão superior a 10 mm.

Recomenda-se que a distância entre os pontos de partida (ponto A entre ponto B) não seja superior ao dobro de 370,400 km para que ocorra intersecção entre os dois azimutes, pois neste experimento, a distância entre o ponto A e o ponto B foi de 381,963 km.

Os autores sugerem também outras técnicas computacionais utilizando somente as fórmulas diretas de Vincenty. No qual, injunciona-se o comprimento da geodésica e utilizando algoritmos recursivos de tentativa e erro (*backtracking*) para a estimação dos azimutes que satisfaçam a condição de intersecção do ponto *P*, desta forma, dispensando o cálculo aproximado na superfície esférica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAESCHLIN, C.F.: *Lerbuch Der Geodäsie*. Orell Fuessli Verlag, Zuerich, 1948.
- DECRETO Nº 4.983, DE 10 DE FEVEREIRO DE 2004. Estabelece os pontos apropriados para o traçado das Linhas de Base Retas ao longo da costa brasileira e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2004/decreto/d4983.htm>. Data de acesso: 14/02/2012.
- GALO, M.; MONICO, J. F. G.; OLIVEIRA, L .C. Cálculo de áreas de polígonos sobre o elipsóide usando projeções equivalentes. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003. p. 465-479 (*Series Ciências Geodésicas*, v. 3).
- GEMAEL, C. *Elementos de Trigonometria Esférica*. Curitiba: Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1981.
- GRAFAREND, E.A.: *Map projections*. Springer, Heidelberg, 2006.
- HEITZ, S.: *Coordinates in geodesy*. Springer, Heidelberg, 1988.
- KNEISSL, M.: *Handbuch der Vermessungskunde*, Band IV. J B Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1958.
- KIVIOJA, L. A.: Computation of geodetic direct and indirect problems by computers accumulating increments from geodetic line elements. *Bull. Geod.*, 99, 55–63, 1971.
- LEI Nº 7.525, DE 22 DE JULHO DE 1986. Estabelece normas complementares para a execução do disposto no art. 27 da Lei nº 2.004, de 3 de outubro de 1953, com a redação da Lei nº 7.453, de 27 de dezembro de 1985, e dá outras

- providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/1980-1988/L7525.htm. Data de acesso: 14/02/2012.
- LEI Nº 8.617, DE 4 DE JANEIRO DE 1993. Dispõe sobre o mar territorial, a zona contígua, a zona econômica exclusiva e a Plataforma Continental brasileiros, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L8617.htm. Data de acesso: 14/02/2012.
- MORITZ, H. (1980). Geodetic Reference System 1980. *Bull. Geod.* 54(4), 395–405.
- SAITO, T.: The computation of long geodesics on the ellipsoid through Gaussian quadrature.” *Bull. Geod.*, 98, 341–374, 1979.
- SJOBERG, L.E. Geodetic intersection on the ellipsoid. *J Geod.*, n. 82, p. 565-567, 2008.
- SODANO, E. M. (1965). General non-iterative solution of the inverse and direct geodetic problems. *Bull. Geod.*, 75, 69–89.
- THOMAS, C. M., FEATHERSTONE, W. E. Validation of Vincenty’s Fórmulas for the Geodesic Using a New Fourth-Order Extension of Kivioja’s Formula. *Journal of Surveying Enginnering*, p 20-26, fevereiro 2005.
- VINCENTY, T.: Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. *Surv. Rev.*, XXII (176), 88–93. 1975.

Recebido em setembro de 2014. Aceito em novembro de 2014).

LAND CAPABILITY EVALUATION FOR ECOTOURISM DEVELOPMENT IN ILAM PROVINCE, A GIS APPROACH

*Avaliação da capacidade da terra para desenvolvimento de ecoturismo na
província de Ilam, uma abordagem com utilização de SIG*

MEHDI AHMADI*¹
SHAMSOLLAH ASGARI²
EZATOLLAH GHANAVATI³

¹Department of Geomorphology, Faculty of Geography, Kharazmi University,
Tehran, Iran

²Scientific Member of Agriculture and Natural Resources Reserch Center of Ilam
Provience, Iran

³Department of Geomorphology, Faculty of Geography, Kharazmi University,
Tehran, Iran

*Corresponding Author: Mehdi Ahmadi; Email: mehdi.ahmadi2009@gmail.com;
Cell Phone: +989189405535

ABSTRACT

As one of the most wealth-generating industries in the world, tourism has been the center of attention by many governments worldwide. Depending on the purpose of tourism, it has been classified into different types, one of which is ecotourism. Given that ecotourism currently accounts for a small part of the whole, however, it has a rapid growth rate. The present study aims at zoning suitable areas in Ilam, a province in western Iran, for ecotourism development purposes. Accordingly, the digital maps of elevation, slope, land cover/land use, mineral springs, and water resources were prepared, at first. Afterwards, the suitable and unsuitable areas were segregated by Boolean functions. Overlaying the map layers by GIS software, the suitable areas were identified. The obtained results revealed that the top attractions are mainly distributed from the northern and central province to the southeastern parts where climatic condition is favorable, and rich in natural land cover and water resources. Moreover, the southern and western parts were evaluated poor in term of eco-tourist attractions.

Keywords: Land Capability Evaluation; Ecotourism Development; Boolean Algebra; Ilam Province (Iran); Geographic Information System; Remote Sensing.

RESUMO

Como uma das indústrias mais geradoras de riqueza no mundo, o turismo tem sido o centro das atenções de muitos governos em todo o mundo. Dependendo da finalidade do turismo, ele foi classificado em diferentes tipos, um dos quais é o ecoturismo. O ecoturismo é responsável atualmente por uma pequena parcela das receitas; no entanto, tem uma alta taxa de crescimento. O presente estudo de caso visa ao zoneamento de áreas adequadas em Ilam, uma província no oeste do Irã, para fins de desenvolvimento do ecoturismo. Assim, foram elaborados inicialmente os mapas digitais de altitude, declividade, cobertura vegetal, uso do solo, nascentes de água mineral e de recursos hídricos. Depois, as áreas adequadas e inadequadas foram separadas por funções booleanas. A sobreposição das camadas através de um GIS permitiu identificar as áreas mais adequadas. Os resultados obtidos revelaram que as principais atrações estão localizadas, principalmente, nas províncias do norte e central, em direção sudeste, regiões em que a condição climática é favorável, e são ricas em recursos naturais de cobertura do solo e de água. Além disso, as regiões sul e oeste foram avaliadas como pobres em termos de atrações eco-turísticas.

Palavras-chave: Avaliação da Aptidão das Terras; Desenvolvimento do Ecoturismo; Álgebra Booleana; Província de Ilam (Irã); Sistema de Informação Geográfica; Sensoriamento Remoto.

1. INTRODUCTION

Tourism development as an economic activity has a significant impact on empowering local communities. The role of tourism, as a new source of job creation, revenues, taxes, and currencies, has been taken into consideration by numerous studies (Howard, 2009).

Nowadays, the development of tourism is widely accepted and placed on the agenda by developing and developed countries (Stueve, 2002). Tourism leads money and population from industrial centers towards natural and rural areas. The revenue from tourism contributes to the economy and social welfare of the host country (Cater, 1994). According to World Tourism Organization (WTO), ecotourism proportion will reach from the current of 7% to 20% in the coming decade (Ross, 1980).

Although tourism development may cause loss of native language and local culture (Miller, 2001), it can cause the development of the host countries in terms of educational and cultural conditions (Brandon, 2001). Therefore, sustainable ecotourism is one aspect consistent with the nature (Hunter, 1997). Ecotourism is considered as a part of sustainable tourism (Ceballos-Lascurain, 1993; Wells, 1992). Providing opportunities for employment of services provided by locals and

giving natural unspoiled areas an economic value are the most important benefits of ecotourism (Alpert, 1996).

It can also create benefits for local people and attract international support for protected areas (Fennel, 1999). Hence, the support and participation of local people is essential to achieve sustainable ecotourism (Yoon, 2001). Ecotourism development should increase the maximum local participation in conservation of natural areas (Cooke, 1982).

The correct diagnosis of tourist behavior will contribute to suitable site selection of tourist destinations (Bansal, 2004). Ecotourism is defined as responsible travel to nature where the flora, fauna, and cultural heritage are the primary attractions in a way to conserve the environment and improves the well-being of local people (Boo, 1990). Due to great income generation, tourism and ecotourism have urged countries to pay special attention to this industry (Tremblay, 2006). This form of tourism is based on purposeful travel coupled with cultural and spiritual understandings of a variety of natural phenomena (Choong, 2008). Ecotourism means traveling to different parts of countries to visit natural monuments and get more familiar with different cultures.

Given the mentioned circumstances, what is important in this type of tourism is the issue of sustainability (Honey, 2008). Valuation of ecosystem services and natural environment is very important for sustainable tourism management. There has been a wide range of approaches and methods presented in recent years to evaluate ecosystem values (Eade and Moran, 1996; Guo *et al.*, 2001; Hein *et al.*, 2006; Troy and Wilson, 2006; Egoh *et al.*, 2008). According to literature, Ceballos-Lascurain (1993) is the one who first used the concept of ecotourism. He defined it as "a form of environmentally responsible tourism that involves travel and visitation to relatively undisturbed natural areas with the object of enjoying, admiring, and studying the nature (the scenery, wild plants, and animals), as well as any cultural aspect (both past and present) found in these areas, through a process which promotes conservation, has a low impact on the environment and on culture and favors the active and socioeconomically beneficial involvement of local communities".

Banerjee *et al.* (2002) identified potential ecotourism sites in eastern India using Remote Sensing (RS) and GIS techniques in forest dominated areas of western Midnapore, West Bengal. They prepared the final ecotourism capability map by overlaying the map layers of land use/land cover, soil fertility, and ecological features.

Bukenya *et al.* (2002) applied GIS to zone Uganda National Park (Bukenya, 2002). Dondo *et al.* (2003) performed a research entitled "GIS in tourism – A Zimbabwean perspective, the international archives of photogrammetry" to specify situation of the resort areas to the visitors. Changa *et al.* (2007) used the maps of topography, land cover/land use, and human resources to identify suitable areas for ecotourism development (Changa, 2007).

In a study by Elliott-White in 1997, the application of GIS in post-modern tourism marketing was investigated. Further, the role of GIS in tourism planning and rural economic development was studied by Savitsky et al. in 1999. The researches by Lee and Mjelde in 2012, Sanjay in 2007, Lung Shaw in 2007, and Baral in 2007 are other examples of feasibility studies for ecotourism development. Turner et al. in 1995 and Laughland et al. in 1996 mainly focused on the role of ecosystem services in ecotourism blooming.

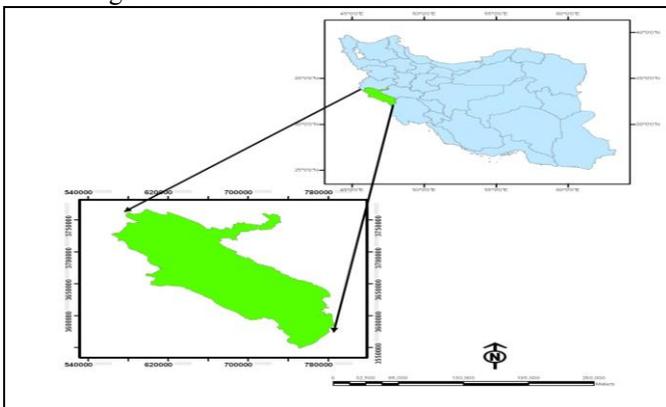
There are some relevant research projects conducted by Department of Environment of Ilam Province on ecotourism development. As such, the historic buildings of Ilam by Heidari et al. in 2003, investigation of tourism building in Ilam by Johari in 2005, and land capability evaluation of Ilam are among notable research projects that could be mentioned (Jafree, 2003). Although Iran is ranked 10th in the world in terms of tourist attractions and 5th in the world in view of Earth's greatest biological diversity, however, it has failed to take a proper position in the world in attracting tourists. The share of tourism revenues in Iran is about a thousandth of the global income (Amami, 2000). Despite having many attractions, there have been done no scientific feasibility studies on introducing and analyzing potential sites for ecotourism development. Accordingly, the present study was conducted to introduce ecotourism values of the Ilam Province. The obtained results could be used by tourists and planners.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 The study area

The Ilam Province, with an area of about 20, 150 m², includes approximately 1.4% of the total area of Iran. It is situated in western and southwestern Iran between the latitudes 31° 58'-34° 15' N and the longitude 45° 24'-48° 10' E (Encyclopedia of Ilam City, 2008) (Figure 1).

Figure 1- Situation of the Ilam Province in Iran



2.2 Boolean Logic Model

In overlaying function, the Boolean logic operations are based on Boolean algebra in which the values of the variables are the truth values *true* and *false*. First used by Varennes in 1947, the Boolean model is a multi-conditional inquiry by which suitability maps could be presented as 0 and 1 subsets (Olazade, 2005). This model has a two-element set of suitability and unsuitability and there is no other state in the middle (Sanaei Nejad, 1999).

2.3 Data collection and processing

In order to evaluate ecological capability of Ilam Province, the maps of land cover, slope, land use, and hydrology were used. The topographic map of the study area at the scale of 1:50,000 was used to extract some geomorphological features including faults, ridges, and elevation points. The slope map was extracted from the Digital Elevation Model (DEM) to specify areas with the slope of higher than 20%, which are suitable for rock climbing, hiking in steep terrain, mountaineering, and hillside climbing. The Indian Remote Sensing (IRS) LISS-III (Linear Imaging Self Scanning Sensor) sensor (with the spatial resolution of 23x23m) and ETM⁺ satellite images were prepared from the Geographical Organization of Iran in order to extract land use and land cover map of the study area using ERDAS IMAGINE Software. It is worth mentioning that LISS-III sensor is an optical sensor working in four spectral bands of green, red, near infrared, and short wave infrared. It covers a 141 km-wide swath with a resolution of 23 metres in all spectral bands. The current land use map was obtained from the landsat satellite images dating to 2002. The isothermal map of the province was used to zone suitable temperature areas and to identify places with low temperature for winter activities such as skiing. Moreover, the slope and hillshade maps were used to identify the accumulation places of snow and ice as an important prerequisite for establishment of ski resort. It is worth noting that the mentioned maps were all prepared from the DEM. The drainage network map of the province at the scale of 1:250,000 was prepared from the Department of Environment (DOE). The map of fragile habitats and protected areas was obtained from Administration of Environmental Protection in Ilam Province. The data was used for zoning authorized hunting and fishing areas. The map of historic attractions was prepared based on the comprehensive plan for feasibility study of typical tourism resorts conducted by Cultural Heritage Department of Ilam Province. These areas were represented as a point map taken by GPS from the study area.

2.4 Data processing

After preparing all the required map layers, they were converted from vector into the raster format. After importing into the GIS, the map layers were scrutinized and converted into a unique coordinate system and the same cell size in order to make them standardized. Based on the DEM of the study area, the cell size was 90x90m. The data coordinate system was WGS84, Zone 38N. In Boolean logic, the units of each map layer are weighted based on the zero and one logic. In other

words, each cell size of the final map is suitable or unsuitable for ecotourism development and there is no intermediate state. The logic is involved in two numbers; 0 and 1, of which 1 represents suitability of a pixel size, while 0 shows unacceptable situation or unsuitability of a pixel size (Hall et al,1992). Tables 1 and 2 give the functions applied for overlaying each of the map layers. After weighting the map layers, the final ecotourism development map was prepared using Boolean logic. The spatial distribution of suitable tourism resorts are specified are presented on the final map.

Table 1- Map layers used for Boolean-based ecotourism land capability evaluation (Faraj Zadeh, 2008)

No.	Map layers	Type of tourist activity							
		Mountain neering	Hill side climbing	Hiking- insteep terrain	Skiing and other winter sports	Water sports and fishing	Eco-tourism	Hun-ting	Visi-ting historical monu-ments
1	Elevation	*	*	-	*	-			
2	Slope	*	*	-	*	-			
3	Land cover	-	*	-	-	-	*		
4	Aquatic surfaces	-	*	-	-	*	*		
5	Rivers	-	*	*	-	*	*		
6	Mineral springs	-	-	*	-	*	-		
7	Geology	-	*	-	-	-	*		
8	Land suitability	*	*				*		
11	isothermal				*	*	*		
12	Isohyethal		*		*	*			
14	Historic affractions								*
15	Habitats							*	

Table 2- Applied functions for overlaying of the map layers (Faraj Zadeh, 2008)

No.	Type of tourist activities	Applied function
1	Mountaineering & Rock climbing	Areas with the slope of 20% and elevation classes of higher than 1800 m
2	Rock climbing	Areas with a slope of greater than 50%
3	Rock climbing and watching natural landscapes	Areas with an elevation of 800-2050m and a slope of 20-70% where there are woodlands with different classes
4	Skiing and winter sports	Areas with altitudes of over 2,300 m and a slope of 20-70% where there is a possibility of accumulating snow for ski resort
5	nature therapy	Areas within a radius of 1,500 m from the mineral springs as well as rivers with sandy beaches
6	Water sports and fishing	Areas on the 1-km periphery, around the lake and aquatic surfaces such as dams as well as the distance of 1500 m from the riverbeds
7	Ecotourism	Areas with beautiful sceneries
8	Hiking in steep terrain	Areas with an attitude of over 1800m and a slope of greater than 30%
9	Visiting historic monuments	Areas situated at a distance of 500 m away from the historic monuments (Mirzaei, 2009)

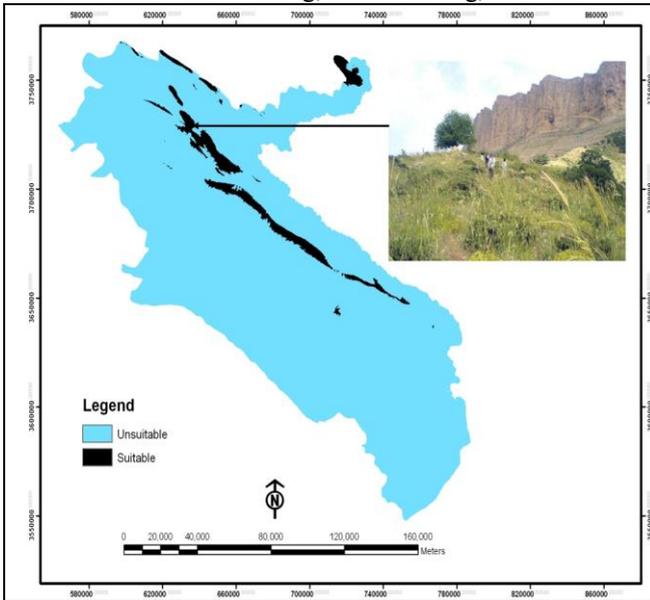
3. RESULT AND DISCUSSION

3.1 Suitable zones for mountaineering, caving, and rock climbing

The suitable zones for caving in the Ilam Province include the areas with the height of over 1,800 m and a slope of 20% to 70% where there are pristine and natural caves. Covering 3.8% (75519 ha) of the entire area of the province, this zone embraces mountains Kabir Kouh, Manasht, Sivan Kouh, Ghalarang, Guachan, Dinar Kouh, and Ghalajeh (Ahmadi, 2009). These areas are located mainly in the central and southeastern province at the border between the cities of Abdanan and Dare Shahr, as well as in the northern and northwestern province parallel, to the main highlands and the boundary line of the Zagros. Figure 2 demonstrates suitable zone for caving, rock climbing, and mountaineering: The upper right-side picture is Manasht Mountain situated in the northern Ilam. The mountain is one of the richest wildlife habitats in the province, even in Iran, which has the height of 2,629 m above sea level. In the bottom right photo, Varzin Peak is illustrated as the tallest point of Kabir Kouh Mountain as well as the highest point in the province. This mountain range extends as a great wall to the length of 240 km playing an important role in plant and animal life of the Ilam Province. A large part of the area has high

potential to rock climbing sport. This zone contains a large number of the county's well-known caves, one of which is Agha Cave has not been explored yet.

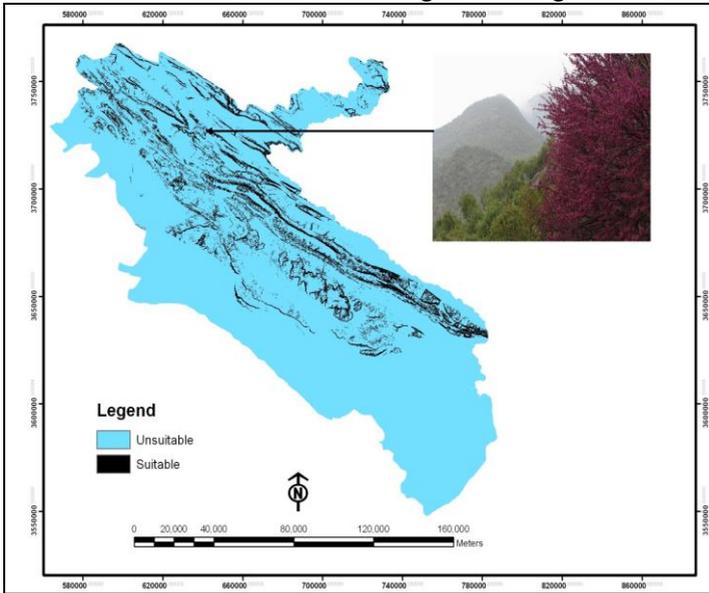
Figure 2- Suitable zone for caving, rock climbing, and mountaineering.



3.2 Suitable zones for hillside climbing and visiting natural landscapes

This zone includes 10.3%(189463 ha) of the total area of the province. The height of more than 800 m and less than 2050m and the slope ranges between 20% to 70% are the most important constraints in this zone so as only 46%(92731 ha) of the province is suitable for hillside climbing. The average annual temperature of the zone varies between 12 °C to 20 °C. The rainfall ranges between 400 mm to 900 mm. Around 80%(151570 ha) of these hillsides are covered by woodlands, mainly extending in northern and central province. These areas have the greatest amount of rainfall in the province. The oak forests, beautiful rivers, and different pasture types offer unique sceneries to the visitors. These areas do not include the height of over 2050 m (in northern and central highlands) as well as gentle slopes and flat places in southern and border areas where are poor in terms of rainfall and land cover. Figure 3 depicts suitable zones for hillside climbing and visiting natural landscapes. The picture on the right shows the famous Arghavan Strait located at a distance of 3 km from the Ilam City. This zone is one of the most suitable herbal habitats in the province. It is also considered as one of the Iran's redbud species habitats. In fact, one of the densest oak forest reservoirs in the province and even in the country is located in this zone.

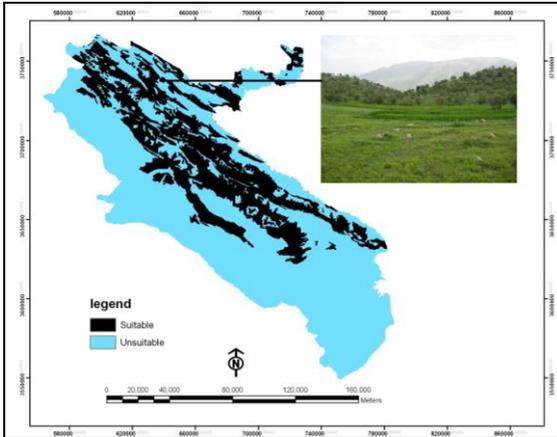
Figure 3- Suitable zones for hillside climbing and visiting natural landscapes



3.3 Suitable zones for ecotourism and individual or family camping

The suitable zone for ecotourism includes areas with beautiful sceneries. This zone covers 37.3% (592808 ha) of the entire study area. Having dense and semi-dense oak forest and permanent springs and streams, these areas can be a good place for ecotourism (Ahmadi, 2011) that mainly distributed in the northern province. these areas include Dalahou Forest Resort, Arghavan, Bankoul, Nam Tang, Tang Ghir, Dare Kalam, Tang Kafouri Resort, Tang Hianan, Khoran, Shesh Kalan, Mishkhas, the watershed of the Ilam Dam, and Dinar Mountain. The zone has the vastes area in the Counties Ilam, Ivan, Shirvan Chardavel, and Dare Shahr. and The zone has the highest rate of precipitation (864 mm in Chenarbashi and 750 mm in the hillsides of Sharezoul) due to the high altitude and western winds. Rare and unique plant and animal species in some areas (Manasht, Bankoul, Sheshkalan, and Kolam), beautiful natural landscapes, tectonic forms, karst land forms, diverse plant species (Mozaffarian, 2005), and pleasant climatological conditions provide the most suitable recreational zones in the county. Figure 4 presents suitable zones for ecotourism and individual or family camping: The top right photo shows the recreation area of Bankoul in the Northern Province and the photo on the bottom depicts the recreation area of Malle Panjab as one of the most well-known resorts in the province.

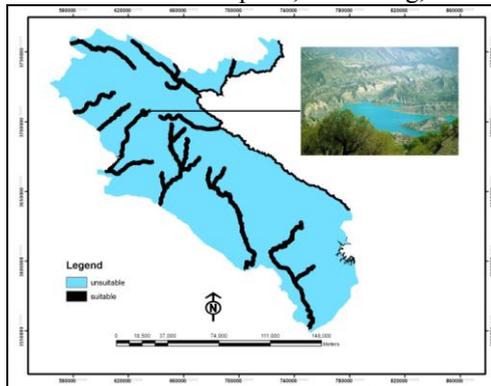
Figure 4- Suitable zones for ecotourism and individual or family camping



3.4 Suitable zones for water sports, swimming, and fishing

This zone is scattered in many different places, including around 12.4% (280703 ha)of the entire area of the province. The River Samireh, the longest river in the province, Kangir River, Siah Gav Wetland, the water basin of the Dams Ilam, and Ranguvan are among important water sport resorts. These areas include mainly the 1500 m-periphery of the major rivers and springs. Figure 5 shows suitable zones for water sports, swimming, and fishing. The top right photo shows the artificial lake of the Ilam Dam while the bottom photo is one of the most amazing natural aquariums of Iran situated at the distance of 140 km far from the Ilam City resulted from the karst water discharge of Kabir Kouh Mountain. The aquarium has a depth of 30 m and the total area of both wetlands is less than 1 ha. This zone has been selected as one of the international target resorts.

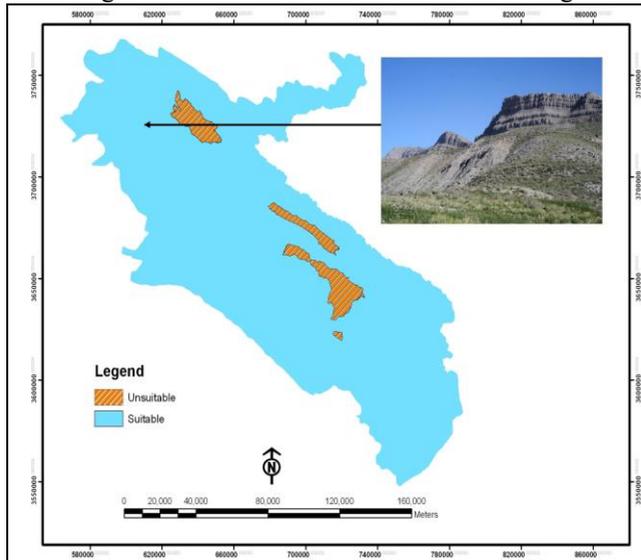
Figure 5- Suitable zones for water sports, swimming, and fishing



3.5 Suitable zones for hunting

In these areas, fishing and hunting must be done with the permission and under certain conditions. This zone does not include the protected areas of Manasht and Gholarang in the western province. As mentioned earlier, it is not allowed to hunt in other areas of the province unless observation of the necessary conditions. This is to prevent poaching. This zone includes large parts of the province. Figure 6 illustrates suitable zones for controlled hunting: The picture on the right is one of the Ilam's animal habitats. The hunting and fishing is done in this zone under specific conditions in the anticipated seasons. The limitation is severe in hunting of mammals due to a sharp decline in their numbers in recent years.

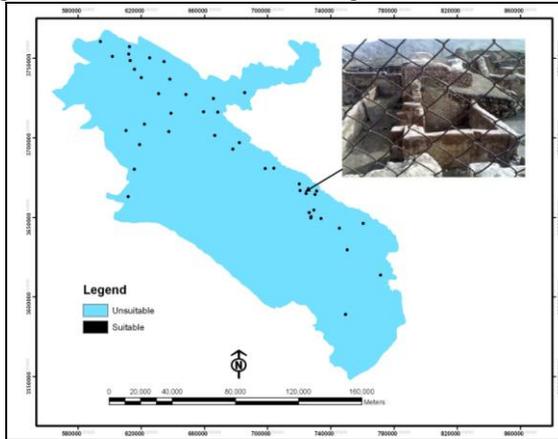
Figure 6- Suitable zones for controlled hunting



3.6 Suitable zones for visiting historical monuments

This zone covers historical places including Tange Ghir and Shams, presenting a combination of pristine natural landscapes and historical monuments. Among the historical target resorts in the province can be pointed to the Villages Sarabkalan, Zanjire Olia, and Sarab Kalam as well as Madakto Historical City and fringe areas of Abdanan. The beautiful natural landscape with historical monuments makes the area among foremost tourism resorts. This zone consists 0.6%(13282 ha) of the total area of the province. Figure 7 shows suitable zones for visiting historical monuments: The photo on the right is Madakto Ancient City dating to the fifth century BC.

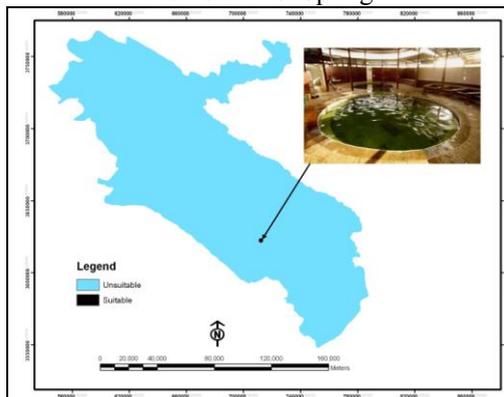
Figure 7- Suitable zones for visiting historical monuments



3.7 Suitable zone for nature therapy

This zone includes areas in adjacent to the mineral springs. Covering approximately 0.1%(710 ha) of total area of the province, these areas are situated in Dehloran County (Dehloran Hot Spring, 3 Km away from the Dehloran County), Ilam County (Tang Bichar Hot Spring), and Dashtlag Hot Spring. Sulphurous hot springs with healing properties are located at a distance of 3 km from the Dehloran County, at the hillside of Siahkouh Mountain and in the vicinity of the Khofash (semantically equivalent to bat) Cave. With an approximate temperature of 50 °C, it contains hot springs and sludge therapy pools that are of particular health care importance. This is a very effective healing source for rheumatism, allergies, wounds, broken bones, and bruises (Figure 8).

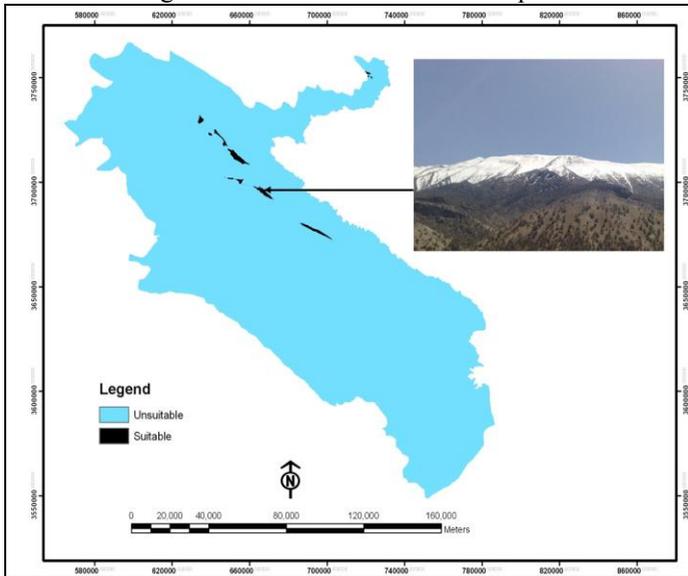
Figure 8- Suitable zone for nature therapy: The photo on the right illustrates the Dehloran Hot Spring



3.8 Suitable zones for winter sports

The Ilam Province has high and dense mountains. The mountains with an altitude of over 3000 m are rarely observed in the province so that the mountains higher than 2000 m include less than 2% (8087 ha) of the total area of the province. There are few mountains in the province with the altitude of higher than 2600 m. Heavy snow showers in winter (more than 400 mm) have created a thick layer of snow on the mountains. The suitable areas for winter sports constitute around 1.51% (8087 ha) of the total area of the province. Figure 9 gives suitable zone for winter sport. The photo on the right is one of the Kabir Mountain's peaks where is suitable for winter sports. The height of the top of the peak is 9 thousand feet where the rainfall exceeds 1000 mm per year. Heavy precipitations in winter provide that certain conditions for winter sports.

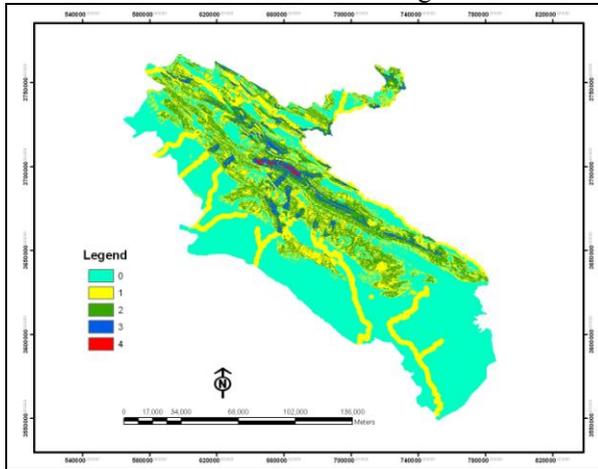
Figure 9- Suitable zone for winter sport



3.9 Final ecotourism zoning map

After overlaying the map layers using the Boolean model, the ecotourism land capability map was prepared. According to which, the Ilam Province is divided into small zones of 0, 1, 2, 3, and 4 (Figure 10).

Figure 10- Final map of suitable zones for ecotourism planning in the Ilam Province based on the Boolean logic



The zone No. 0: this zone has no potential for ecotourism development. It includes 47% (1029652 ha) of the total area of the province. Homogeneous terrain in the southern and border areas creates a uniform landscape in the Zone 0. Accordingly, gentle slopes and the altitude of less than 800m, the zone has no potential to establish any of the tourism activities listed except for the areas in the periphery of the rivers and the Dehloran Hot Spring.

Zone No. 1: this zone has the required potential for just one ecotourism activity. Including more than 26% (520612 ha) of the entire area, this zone has the largest extent in the province. It covers southern and border areas, the 1500m - periphery of the Rivers Doyraj, Meymeh, Gavi, and Changouleh. This zone can be seen in the southern province as a yellow spot including the Dehloran Hot Spring. The hillside climbing and water sports are among the tourism resorts of the zone.

Zone No. 2: this zone is mainly scattered in the central and Northern Province where the required potentials for the hillside claiming and ecotourism are provided and forest land cover reaches its greatest extent. The altitude of this zone ranges between 800 m to 2000 m and the rainfall varies from 400 mm to 800 mm. Constituting 17% (341325 ha) of the total area, this zone is seen as spots in other parts of the province.

Zone No. 3: As a long string, this zone is stretched from the northern to the central and southeastern province. It is situated in the hillside of the Kabir Mountain as well as the high mountains in the north with potentials for the ecotourism activities including mountaineering, caving, visiting natural landscapes, winter sports, and camping. The dense and semi-dense woodlands cover around 90%

(58842 ha) of the zone. As the most suitable area for rock climbing sport, this zone is one of the pristine areas of the province including lush green slopes of the high mountains. It is among the rainiest regions of the province covered by oak forest with dense and semi-dense canopy and bulk volume rocks. Around 3.6% (65392 ha) of the total area of the zone is allocated to the zone 3.

Zone No. 4: this zone is usually observed as red spots throughout the central province where the highest elevation is 3062 m (Varzing) and the maximum precipitation is 863 mm (in Chenarbashi Village). Having a wilderness landscape, this zone has the required potential for the ecotourism activities including mountaineering, hillside climbing, visiting natural landscapes, ecotourism, and winter sports. This zone has the highest potential for ecotourism development compared to other areas. Although the Ilam Province, with an area of 20000 km², is considered as one of the smallest provinces of Iran, however, it has an incredible diversity of climatic and pedologic situations. It is a few kilometers away from the snow-capped mountains and includes warm plains, and the old oak and palm trees. In general, the different highlands compose the landscape of the Ilam Province. The mountain landscape with forested valleys is created one of the most beautiful natural landscapes in the region (Figure 10).

4. CONCLUSION

The results obtained from data analysis revealed that around 53% (1029652 ha) of the total area of the Ilam Province has the required potential for ecotourism activities such as mountaineering, caving, hillside climbing, nature therapy, winter sports, etc. In this study, the map layers including elevation, slope, land cover, hydrology and so on were overlaid using Boolean logic to determine land capability of the province for different ecotourism activities. According to the results, the ecotourism with the total area of more than 30% (592808 ha) allocates itself the maximum extent. This is due to rich land cover and forest areas of the province so that woodland and rangeland areas cover 30% (619179 ha) and 80% (1634634 ha) of the total area of the province, respectively. The second top priority tourism activity is hillside climbing due to high density of mountain areas covered by wilderness land cover in an area of 10.7% (186463 ha) with gentle slopes. The nature therapy with an area of less than 0.1% (710 ha) has the smallest extent in the study area. It is worth nothing that these zones were identified based on the rigorous approach of Boolean logic and it does not mean that other areas have a poor recreational potential. The other parts could also be evaluated from other points of view. What has been investigated in this research is to zone and introduce suitable sites in the form of an ecotourism map which can be used as a workplan for ecotourism development in the study area.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their sincere appreciation to the proofreading services rendered by *Ravian Danesh Mohit Company*.

REFERENCES

- AHMADI, M., identify areas suitable for geotourism development in Ilam province using GIS. Master's thesis. Kharazmi University, 2009.
- AHMADI, M. identify areas suitable for ecotourism development in the Darecahr township using AHP model. *International Conference on Tourism and Sustainable Development*, Tehran, 2011.
- AMAMI MEYBODI, A. Principles of Performance Measurement and Productivity Institute. *Business Research*, 2000.
- BARAL, B.; STERNB, M. J.; BHATTARAI, R. Contingent valuation of ecotourism in Annapurna conservation area, Nepal: Implications for sustainable park finance and local development.
- ALPET, P. Integrated conservation and development projects. *Bioscience*, 46, P. 845–855, 1996.
- BANSAL, P. D.; ARNOLD, J.; ELBERG, M. A.; KALDA, J.; SOESOO, A.; VAN MILLIGEN, B. P., "Melt extraction and accumulation from partially molten rocks", *Lithos*, 78, 25, 2004.
- BANERJEE, U.K.S.; KUMARI, S.K.P.; SUDHAKAR, Remote Sensing and GIS based ecotourism planning: A case study for western Mindnapore, West Bengal India, 2002.
- BOO, E. "Ecotourism: The potentials and pitfalls", Washington, DC, World Wildlife Fund: 21-33, 1990.
- BOYD, S.W.; BUTLER, R.W.L.; HAIDER, W.; PERERA, A. Identifying areas for ecotourism in northern Ontario: application of a geographic information system methodology. *Journal of Applied Recreation Research*, 19, P.41–66, 1994.
- BRANDON, K. Ecotourism and conservation: A review of key issues. Washington, DC: World Bank. 1996.
- BRANDON, K. Moving beyond Integrated Conservation and Development Projects (ICDPs) to achieve biodiversity conservation. In D. R. Lee, & C. B. Barrett (Eds.), *Tradeoffs or synergies? Agricultural intensification, economic development and the environment*. New York, NY: CABI Publishing. pp. P.417–432, 2001.
- BUKENYA; JAMES, O. Application of GIS in ecotourism development decisions: evidence from the pearl of Africa, natural resource economics program, West Virginia University – Morgantown, WV, 2, P.6506-6108, 2002.
- CATER, E. Ecotourism in the third world: problems and prospects for sustainability. In E. Cater, & G. Lowman (Eds.), *Ecotourism: A sustainable option?* Chichester: Wiley, pp. 69–86, 1994.
- CEBALLOS-LASCURAIN, H. Ecotourism as a worldwide phenomenon. In K. Lindberg, & D. Hawkins (Eds.), *Ecotourism: A guide for planners and managers*, p. 12–14, 1993.

- CEBALLOS-LASCURAIN, H. Introduction. In K. Lindberg, M. E. Wood, & D. Engeldrum (Eds.), *Ecotourism: A guide for planners and managers*, pp. 7–10, 1998.
- CHANGA, K.F.; C.M.; CHIANBG, P.C. Chouc, Adapting aspects of GB Tool 200`—searching for suitability in Taiwan, *Building and Environment*,42, P.310–316, 2007.
- LEE CH. K.; SONG H.J.; Mjelde J.W. the forecasting of international Expo tourism using quantitative and qualitative techniques. *tourism management*,29,P.1054-1098, 2008.
- COOKE, K. Guidelines for socially appropriate tourism development in British Columbia. *Journal of Travel Research*, 21, P.22–28,1982.
- DYE, A.S.; LUNG SHAW, SH. A GIS-based spatial decision support system for tourists of Great Smoky Mountains National Park. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 14, P.269–278, 2007.
- DONDO, CH.; BHUNU, S.T.; Rivertt, U. GIS in tourism – A Zimbabwean perspective , the international archives of photogrammetry, *remote sensing and spatial information sciences*,vol .xxx IV, part 6/w6. 2003.
- EGOH, B.; REYERS, B.; ROUGET, M.; RICHARDSON, D.M.; LE MAITRE, D.C.; VAN JAARSVELD, A.S. Mapping ecosystem services for planning and management. *Agriculture, Ecosystems and Environment* ,127, P.135–140, 2008.
- ELLIOTT-WHITE, M.P.; FINN, M. Growing in sophistication: the application of geographic information systems in post-modern tourism marketing. *Journal of Travel and Tourism Marketing* ,7 ,P.65–84, 1997.
- Encyclopedia of Ilam city. *Armed Forces Geographical Organisation Publishing*. Tehran, Iran. 2008.
- FARAJ ZADEH, M. Analysis zones for ecotourism development in Kurdistan province using GIS, *Journal of Geographical research*, 2008.
- GUO, Z.W.; XIAO, X.M.; GAN, Y.L.; ZHENG, Y.J. Ecosystem functions, services and their values—a case studies in Xingshan County of China. *Ecological Economics* ,38, P.141–154, 2001.
- FENNEL. A. D. "Ecotourism an Introduction" Routledge, p. 315,1999.
- HALL, G.B.; WANG F.; SUBARYONO, S. Comparison of Boolean and fuzzy classification methods in land suitability analysis by using geographical information systems. *Environment and Planning*, A. 24, P.497–516, 1992.
- HEIDARI, S.; BEIGI, M.; MOHAMMADI, S. Anthropology of Tourism , Tourism Master Plan ,university of Ilam. 2003.
- HEIN, L.; VAN KOPPEN, K.; DE GROOT, R.S.; VAN IERLANDE, E.C. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics* ,57,P. 209–228. 2006.
- HETZER, N. D. "Environment, Tourism, Culture", links(July), Reprinted in *Ecosphere*: P.141-158,1965.

- HONEY, M. *Ecotourism and Sustainable Development, Who Owns Paradise?* (Second ed.), Washington Dc., Island Pres, 2008.
- HOWARD, W.R. Risky business? Asking tourists what hazards they actually encountered in Thailand: *Tourism Management*: 30, P.359-365, 2009.
- HUNTER, C. Sustainable tourism as an adaptive paradigm. *Annals of Tourism Research*, 24, P.850–867. 1997.
- JAFREE, G. *Studies of Environmental Tourism*, Ilam University, 2003.
- JOHARI, G. *Evaluation of tourist places in Ilam*, Ilam University, 2005.
- JIANG, J. *Evaluation of the Potential of Ecotourism to the Contribute to Local Sustainable Development: A Case Study of Tengtou Village, China*, Massey University, New Zealand, 2008.
- LAUGHLAND, A.S.; MUSSER, W.N.; SHORTLE, J.S.; MUSSER, L.M. Construct validity of averting cost measures of environmental benefits. *Land Economics* 72 ,P. 100–112, 1996.
- LEE, C.K.; MJELDE, G.W. Valuation of ecotourism resources using a contingent valuation method: The case of the Korean DMZ, *ECOLOGICAL ECONOMICS*, 63 ,P. 511 – 520, 2012.
- MILLER, G. The development of indicators for sustainable tourism: results of a Delphi survey of tourism researchers. *Tourism Management*, 22,P. 351–362, 2001.
- MOZAFFARIAN, V. *Four new species of plant knowledge of Ilam province of Iran*, *Journal of Botany*, 87,P. 28-94, 2005.
- OLAZADE, A. *Process Evaluation Physical Development and Determination of Optimal Directions for Future Development in Saqez Using GIS*, MS Thesis, the Guidance of Gholamali Mozafari, Department of Geography, Yazd University, 2005.
- ROSS, S.; WALL, G. Evaluating ecotourism: The case of North Sulawesi, Indonesia. *Tourism Management*, 20, P.673–682, 1999.
- SANAIE NEJAD, S.H.; FARAJI SABOKBAR, H. A. *GIS Applying GIS in Urban and Regional Planning*, Second Edition, Ferdowsi University Press, Mashhad. (in Persian), 1999.
- SANJAY, P.H.; NEPAL, K.. *Local perspectives of ecotourism development in Tawushan Nature Reserve, Taiwan*, *Tourism Management* ,27 ,P. 1117–1129, 2006
- SAVITSKY, B.; ALLEN, J.; BACKMAN, K.F. The role of geographic information system (GIS) in tourism planning and rural economic development. *Tourism Analysis* ,4 ,P. 187–199, 1999.
- STUEVE, A.; COOK, D.S.; DAWN, D. *The Geotourism study phase I Executive Summary*. The Research Departament of the Travel Industry Association of America Washington, D.C, 2002.
- TREMBLAY, P. *Desert Tourism Scoping Study*, Desert Knowledge CRC, Report 12, Australia, Charles Darwin University, 2006.

- TROY, A.; WILSON, M.A. Mapping ecosystem services: practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. *Ecological Economics*, 60, P. 435–449, 2006
- TURNER, R.K.; FOLKE, C.; GREN, I.M.; BATEMAN, I.J. Wetland valuation: three case studies. In: Perrings, C., Maler, K.-G., Folke, C., Holling, C.S., Jansson, B.O. (Eds.), *Biodiversity loss: economic and ecological issues*. Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA, 1995.
- WELLS, M.P.; BRANDON, K. E. People and parks: Linking protected area management with local communities. Washington, DC: World Bank, 1992.
- WIGHT, P. A. Environmental sustainable marketing of tourism. In E. Cater, & G. Lowman (Eds.), *Ecotourism: A sustainable option?*, Brisbane, Wiley, pp39–56, 1994.
- YOON, Y.; GURSOY, D.; CHEN, J. S. Validating a tourism development theory with structural equation modeling. *Tourism Management*, 22, P. 363–372, 2001.

(Recebido em junho de 2014. Aceito em novembro de 2014).

MODELAGEM DO ERRO SISTEMÁTICO DE DISTÂNCIA NAS MEDIÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA PMD CAMCUBE 3.0

Systematic depth error modeling in range measurements on PMD CamCube 3.0

FELIPE MARTINS MARQUES DA SILVA
JORGE ANTONIO SILVA CENTENO

Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Universidade Federal do Paraná – Curitiba – Paraná - Brasil
felipemarques21@hotmail.com
centeno@ufpr.br

RESUMO

As câmaras de distância são capazes de medir a distância entre o sensor e a superfície dos objetos para cada pixel da imagem. Comparando com os equipamentos de varredura a *laser* possuem a vantagem de obter a distância de vários pontos em um único instante, sem equipamento de varredura. As medidas obtidas pela câmara possuem erros sistemáticos que devem ser minimizados. Alguns fatores como o tempo de integração, a distância a ser medida, bem como a iluminação da cena, influenciam na obtenção da medida. Neste estudo foi analisada a influência da variação do tempo de integração e da distância câmara-alvo na exatidão do cálculo da distância, procurando modelar os erros sistemáticos das medições feitas com uma câmara PMD Camcube 3.0. A modelagem foi feita por meio da Transformada Discreta de Fourier e permitiu diminuir o erro médio quadrático (RMSE) de 15,01 cm para 5,05 cm, para das observações feitas com tempo de integração de 4000 μ s. Também foi verificado que a amplitude do erro é diretamente proporcional ao tempo de integração utilizado.

Palavras-chave: Erro de distância; Câmara de Distância; Tempo de Integração; Análise de Fourier.

ABSTRACT

Range cameras are devices to measure the distance between the sensor and the object surface for each pixel within an image. Comparing to laser scanner they have the advantage of measuring range for several points at the same time without scanning systems. The measurements obtained by a range camera may have systematic errors that must be modeled to correct the measurements. Some factors as the integration time used, the distance to be measured, and the illumination of the scene, may affect the range measurement. In this paper we examine the influence of the integration time and the distance between the camera and the targets on the measured distance, proposing a model for the cyclic error of a Camcube PMD 3.0 camera using the Discrete Fourier Transform. The model allowed to reduce the root mean square error (RMSE) from 15.01 cm to 5.05 cm in observations made with the integration time of 4000 μ s. It was also verified that the error amplitude is proportional to the integration time.

Key-words: Depth Error; Range Camera; Integration Time; Fourier Analysis.

1. INTRODUÇÃO

As câmaras de distância, também conhecidas por *range cameras* ou câmaras ToF (*Time of Flight*), são câmaras capazes de medir a distância entre o sensor e vários pontos (pixels da imagem) da superfície dos objetos de uma cena, em um único instante. Junto com a distância, a amplitude e a intensidade do sinal refletido pela superfície também são medidos, podendo a cena ser estática ou dinâmica (LICHTI, 2008).

Para calcular o valor das distâncias para cada pixel da imagem, a câmara de distância utiliza um dos dois métodos: (a) cálculo do tempo decorrido entre a emissão e o retorno de um pulso *laser* emitido pelo sensor (b) ou medição da diferença de fase entre a emissão e o retorno de um sinal de onda contínua emitido pelo sensor.

As medidas de distância, amplitude e intensidade dos pixels são obtidas em um único instante, sem a necessidade de mecanismos de varredura utilizados nos equipamentos de varredura a *laser* tradicionais (LICHTI, 2008; FOIX et. al., 2011; SHAHBAZI et. al., 2011). Segundo Lichti (2008) esta é a principal vantagem da câmara de distância sobre os equipamentos de varredura a *laser*. Outras vantagens sobre os equipamentos tradicionais de varredura a *laser* são: o baixo peso da câmara e o consumo reduzido de energia (FOIX et. al., 2011); a estrutura compacta com apenas um sensor para captar a informação de distância (FOIX et. al., 2011; SHAHBAZI et. al., 2011), diminuindo os problemas de oclusão; e a alta taxa de aquisição de imagens que possibilita o mapeamento e localização em tempo real (SHAHBAZI et. al., 2011). Lichti (2008) cita como desvantagens a baixa resolução e a limitação de distância livre de ambiguidades.

É possível capturar vários instantes de um movimento – frequência de captura de quadros acima de 25 fps (*frames per second*, ou quadros por segundo) – como uma filmadora comum. Esta câmara pode ser utilizada em atividades como: reconhecimento de gestos ou movimentos humanos, para maior interação homem-máquina ou uso em jogos de vídeo; mobilidade de robôs, para reconhecer cenários e desviar de obstáculos; sensor para reconhecimento de pedestre em via pública, para evitar atropelamentos ou colisão com automóveis; “reconstrução” do movimento executado por um atleta profissional, para melhorar a execução do movimento, etc.

As medidas obtidas com as câmeras são eivadas de erros, originados tanto por fatores ambientais, bem como não ambientais. Alguns fatores interferem no cálculo da distância são: a iluminação da cena, o tempo de integração, a frequência e a amplitude do sinal emitido, as características refletivas dos objetos, a temperatura interna da câmara, a própria distância câmara/objeto.

No presente artigo foi utilizada a câmara PMD Camcube 3.0, capaz de obter imagens de intensidade, distância e amplitude, com 200 x 200 pixels (40.000 pixels). Este equipamento utiliza o princípio *time-of-flight* (ToF) com base no método de diferença de fase, para medir a distância para cada pixel de uma imagem. Foi verificada a influência da variação do Tempo de Integração e da distância câmara-alvo na exatidão do cálculo da distância, procurando modelar o erro cíclico observado nas medições por meio da Transformada Discreta de Fourier.

Convém esclarecer que no desenvolver deste artigo são citados os termos amplitude e frequência. Entretanto, deve-se distinguir entre a amplitude e frequência de modulação do sinal emitido pela câmara, e a amplitude e frequência do erro cíclico observado pela variação da distância câmara/alvo e do tempo de integração.

2. ESTADO DA ARTE

O cálculo de distâncias nas câmeras TOF é influenciado por erros originados por fontes que dependem das características do ambiente, bem como por erros originados por fontes que não dependem das características do ambiente.

Quanto às fontes de erro que não dependem das características do ambiente – também chamados erros instrumentais – pode-se citar: a temperatura do sensor (KAHLMANN et. al., 2008; STEIGER et. al., 2008; CHIABRANDO et. al. (2009); PIATTI e RINAUDO, 2012); o tempo de integração (KAHLMANN et. al., 2006; WIEDEMANN et. al., 2008; FOIX et. al., 2011) e; os materiais de fabricação do sensor (LANGE, 2000; KAHLMANN et. al., 2006; LINDNER E KOLB, 2007; FOIX et. al., 2011).

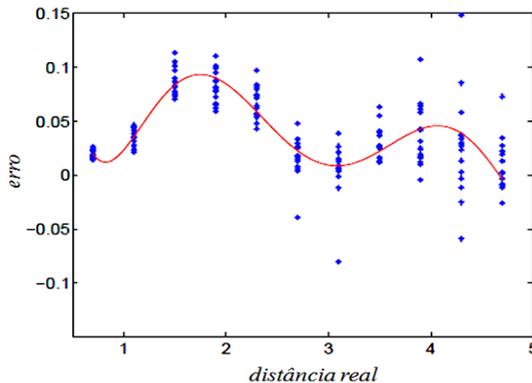
Já as fontes de erro que dependem das características do ambiente, tem-se: a relação sinal-ruído (FOIX et. al., 2011; LIU, 2002); a amplitude da reflexão dos objetos da cena (LINDNER e KOLB, 2007; FALIE e BUZULOIU, 2007; FOIX et. al., 2011); o multi-caminho que o sinal percorre entre a emissão e o retorno (FUCHS, 2012); o espalhamento interno do sinal na câmara (LINDNER E KOLB, 2007; KAREL, 2008; SABOV e KRÜGER, 2008; MAY et. al., 2009; REYNOLDS

et. al., 2011) e; a iluminação ambiente (MÖLLER et. al., 2005; KAHLMANN, 2007; MAY et. al., 2007).

Além das fontes de erros já citadas – as que dependem e as que não dependem das características do ambiente – sabe-se de outras duas fontes de erro: o ângulo de incidência do sinal sobre o alvo (HEBERT e KROTKOV, 1992; ANDERSON et. al., 2005; KIM et. al., 2008) e; a distância entre a câmera e o alvo (LINDNER et. al., 2010; KOLB et. al. 2010; FOIX et. al., 2011).

O presente artigo trata do erro ocasionado pela distância entre a câmera e o alvo. É um erro sistemático que pode ser visualizado mediante um gráfico que relacione a distância medida pela câmera e a distância admitida como verdadeira, onde se observa que tende a uma curva senoidal (ver Figura 1).

Figura 1 – Erro de distância: erro da medida vs. distância real.
Fonte: Foix et. al. (2011).



Segundo Lindner et. al. (2010), Kolb et. al. (2010) e Foix et. al. (2011), este erro ocorre devido à limitações tecnológicas e de custo, de modo que há uma incapacidade de modular perfeitamente o sinal emitido segundo um modelo matemático teórico pré-estabelecido utilizado pela câmera – geralmente senoidal.

Diversos pesquisadores procuraram minimizar este erro por meio de abordagens como: regressão linear, *look-up table*, ajustamento de observações com uso de *B-splines*, funções polinomiais, e algoritmos de modulação/demodulação. Algumas destas pesquisas são citadas nos parágrafos abaixo.

Kuhnert e Stommel (2006), durante a calibração de uma câmera, utilizaram um modelo linear para minimizar o erro de distância, considerando uma janela central 5x5. Também modelaram o desvio padrão por meio de uma função de 2º grau, uma vez que a iluminação decai em função do quadrado da distância.

Já Lindner e Kolb (2006) utilizaram o ajustamento por mínimos quadrados com uma curva *B-spline* para realizar a calibração de distância, desde 3.75m até 7.5m. Dentre outros trabalhos onde foram utilizadas curvas *B-splines* pode-se citar

Kahlman et.al. (2006), Fuchs e Hirzinger (2008), Lindner (2010) e Lindner et. al. (2010).

Também ao realizar a calibração da distância, Khalmann et. al. (2007) utilizaram da técnica *look-up table* (LUT) juntamente com uma matriz FPN (*fixed pattern noise*), que tem por objetivo corrigir erros devidos aos materiais utilizados na fabricação do sensor. Dentre outros autores que fizeram uso da técnica *look-up table* pode-se citar Radmer et. al. (2008) e Hussman et. al. (2012).

Trabalhos de Kim et. al. (2008) e Schiller et. al. (2008) realizaram a correção de distância utilizando funções polinomiais de 3º grau e 6º grau, respectivamente.

Lindner et. al (2008) corrigiram os erros de distância através de um novo algoritmo de demodulação e da consequente amostragem da função de correlação. Consideraram que o sinal emitido é retangular, baseado-se no fato de que, por limitações tecnológicas e de custo, não é viável emitir um sinal perfeitamente senoidal. Já Hussmann e Knoll (2013) desenvolveram um equipamento de iluminação que modula uma onda retangular emitida pela câmera de distância em uma onda senoidal. Posteriormente Hussmann et. al. (2014) desenvolveram um modelo que considera a distribuição de ruídos na imagens de distância, visando atenuar o erro de distância.

Diante do exposto, no presente artigo a correção dos erros de distância foi realizada utilizando a Transformada Rápida Discreta de Fourier e a equação senoidal / cossenoidal da onda.

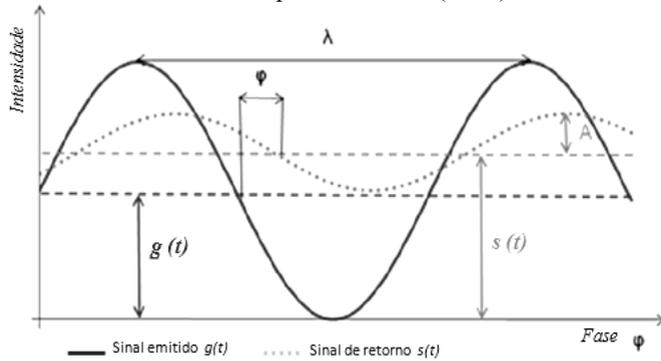
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Câmaras TOF - Princípios

A câmara PMD Camcube 3.0 utiliza o princípio *Time-of-Flight* (ToF) e mede a distância usando o princípio de onda contínua, onde a distância é calculada com base na diferença de fase entre um sinal modulado de onda emitido e o sinal demodulado recebido. A modulação consiste em um processo de alteração da frequência e/ou da amplitude de uma onda eletromagnética, para transmitir um sinal em uma onda portadora. Já a demodulação (ou detecção) consiste no processo inverso, isto é, detectar a onda portadora e extrair o sinal modulado. Uma onda portadora é caracterizada por três variáveis: amplitude, frequência e fase.

Na Figura 1 são mostradas duas ondas senoidais representando o sinal emitido $g(t)$, em linha cheia, e o sinal recebido ou de retorno $s(t)$, em linha pontilhada. A amplitude do sinal de retorno (A) tende a ser menor que a do sinal emitido, uma vez que apenas parte do sinal retorna ao sensor de câmara. O valor da amplitude do retorno influencia a qualidade do valor da distância calculada. Na mesma Figura 1 é mostrada a diferença de fase (ϕ) entre os sinais, e o comprimento de onda (λ).

Figura 1 – Esquema para representação da diferença de fase (φ).
 Fonte: Adaptado de Piatti (2010).



Sendo $g(t)$ o sinal emitido – modulado, ao mesmo tempo, em amplitude e frequência – pelas fontes de iluminação da câmara, representado matematicamente pela Equação 1, e $s(t)$ o sinal recebido que incide sobre o sensor, representado pela Equação 2, as distâncias para cada pixel são calculadas com base em uma função de correlação cruzada (FC) entre estes dois sinais. Esta correlação cruzada, representada na Equação 3, é utilizada para medir o atraso entre o sinal emitido e o sinal recebido, que corresponde à diferença de fase entre os dois sinais (LICHTI, 2008; LINDNER e KOLB, 2006).

$$g(t) = \cos(\omega \cdot t) \tag{1}$$

$$s(t) = k + A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \tag{2}$$

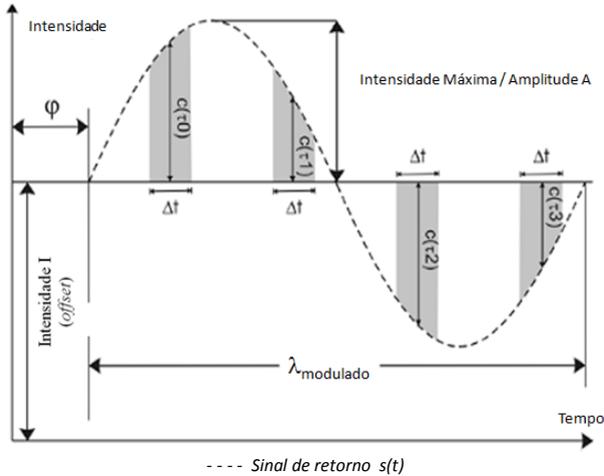
$$c(\tau) = (s \star g)(\tau) = I + \frac{A}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \tag{3}$$

- sendo: $g(t)$ = função do sinal modulado emitido;
- $s(t)$ = função do sinal recebido (ou sinal de retorno);
- $c(\tau)$ = função de correlação entre os sinais emitido e recebido;
- A = amplitude do sinal recebido, utilizado na imagem de amplitude;
- I = intensidade do sinal recebido (*offset*);
- τ = diferença interna de fase;
- \star = operador de correlação cruzada;
- k = componente não modulada, decorrente da iluminação ambiente;
- ω = frequência angular de modulação do sinal emitido $g(t)$;
- φ = diferença de fase entre o sinal emitido $g(t)$ e o sinal recebido $s(t)$;
- t = tempo.

Para o cálculo da diferença de fase, são tomadas quatro amostras da função de correlação, em instantes distintos – $c(\tau_0)$, $c(\tau_1)$, $c(\tau_2)$ e $c(\tau_3)$ – defasados de $\pi/2$ ao longo do tempo, conforme pode ser visto na Figura 2. A diferença de fase é então calculada pela Equação 4 (KHALMANN et. al., 2006).

Figura 2 – Esquema para representação da diferença de fase (φ).

Fonte: Adaptado de Becerro (2008).



$$\varphi = \arctan \left(\frac{c(\tau_0) - c(\tau_2)}{c(\tau_1) - c(\tau_3)} \right) \quad (4)$$

Com o valor da diferença de fase pode-se calcular a distância (D) com a Equação 5,

$$D = \frac{c \cdot \varphi}{4 \cdot \pi \cdot \omega} + N \cdot \lambda \quad (5)$$

onde: c = velocidade da luz;

N = número de ciclos inteiros;

λ = comprimento de onda;

ω = frequência angular do sinal emitido $g(t)$;

φ = diferença de fase entre o sinal emitido $g(t)$ e o sinal recebido $s(t)$.

O termo N representa o número de ciclos inteiros, e é chamado de ambiguidade. A primeira parte da equação é a parte fracionada do sinal e é a única utilizada para calcular as distâncias. Pois, não sendo possível determinar o número de ciclos inteiros, o termo N é desconsiderado. Esta opção por desconsiderar a

ambiguidade N , limita a distância de utilização de câmera ao valor de meio comprimento de onda. Considerando que o sinal é emitido à velocidade da luz e com frequência de 20 MHz, o comprimento de onda será de 15m. Como o sinal tem que percorrer a distância câmara/alvo na ida e na volta, a distância máxima, livre de ambiguidades, entre o sensor e o alvo fica limitada a 7,5m.

O cálculo da distância para cada pixel, por fim, é feito utilizando a Equação 6.

$$D = \frac{c \cdot \varphi}{4 \cdot \pi \cdot \omega} \quad (6)$$

Outras grandezas que podem ser calculadas são: a intensidade, para as imagens de intensidade; e a amplitude, para as imagens de amplitude.

Os valores da intensidade (I) e da amplitude (A) são calculados pela Equação 7 e pela Equação 8, respectivamente (KHALMANN et. al., 2006).

$$I = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{4} \quad (7)$$

$$A = \frac{\sqrt{[c(\tau_0) - c(\tau_2)]^2 + [c(\tau_1) - c(\tau_3)]^2}}{2} \quad (8)$$

sendo:

I = intensidade do sinal de retorno $s(t)$ (*offset*);

A = amplitude do sinal de retorno $s(t)$;

$c(\tau_0)$, $c(\tau_1)$, $c(\tau_2)$, $c(\tau_3)$ = amostras do sinal de retorno, defasadas de $\pi/2$.

3.2. Erro Sistemático

Segundo Landgate (2009), nos equipamentos de princípio EDM distinguem-se três tipos de erros sistemáticos instrumentais: erro de zero, erro de escala, e erro cíclico. Erros sistemáticos ocorrem em estações de medição com princípio EDM, bem como em câmaras de distância (LICHTI, 2008; LINDNER e KOLB, 2006).

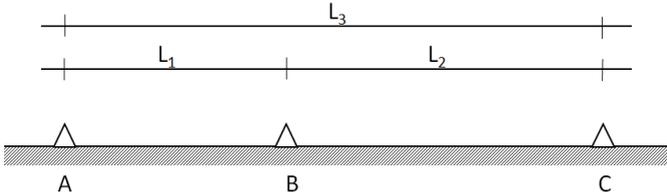
3.2.1. Erro de Zero

É a diferença entre o centro geométrico do instrumento – materializado pela interseção dos eixos vertical, horizontal, e eixo de colimação – e o centro eletrônico do instrumento (FAGGION, 2001). O centro eletrônico é o ponto onde parte o sinal que medirá a distância. Este erro também é chamado de constante aditiva, pois seu valor deve ser somado às distâncias medidas.

Para determinar o valor do erro de zero (Z_0), deve-se medir três distâncias – L_1 , L_2 e L_3 – com o instrumento eletrônico desejado, obtendo as distâncias medidas d_1 , d_2 e d_3 , conforme a Figura 3.

Figura 3 – Distâncias para determinação do valor do Erro de Zero.

Fonte: Adaptado de Gripp (1986).



Com base nestas três medidas e utilizando as Equações 10 e 11, determina-se o valor de Z_0 (FAGGION, 2001).

$$(d_3 + Z_0) = (d_1 + Z_0) + (d_2 + Z_0) \quad (10)$$

$$Z_0 = d_3 - d_1 - d_2 \quad (11)$$

3.2.2. Erro de Escala

Este erro ocorre quando a frequência modulada no momento da emissão do sinal não corresponde exatamente à frequência projetada para o aparelho (MAIA, 1999). Esta alteração no valor da frequência é corrigida por meio da Equação 12, sendo que as distâncias são corrigidas pela equação 13 (FAGGION, 2001).

$$C = \frac{(f_n - f_m)}{f_m} \quad (12)$$

$$d_c = d_m + \frac{(f_n - f_m)}{f_m} \cdot d_m \quad (13)$$

onde:

C = correção (em ppm); d_c = distância corrigida; d_m = distância medida;
 f_n = frequência nominal do instrumento; f_m = frequência medida.

3.2.3. Erro Cíclico

O Erro Cíclico ocorre no processo de medição interna da diferença de fase, devido à diferença de superposição entre o sinal emitido e o sinal recebido (SURVEYOR - GENERAL VICTORIA, 2012).

3.3. Tempo de Integração (TI)

O tempo de integração (TI) consiste no intervalo de tempo disponível para o sensor captar a luz incidente no sensor, sendo similar à velocidade do obturador das câmeras analógicas. A mudança do tempo de integração da câmara afeta os valores de distância em todos os pixels da imagem (FOIX et. al., 2011). O valor do pixel é proporcional ao tempo de integração, podendo ter valores nulos devido à baixa exposição à luz, até valores saturados devido ao excesso de exposição à luz. Ambas as situações acarretam erros nas medidas (OLIVEIRA, 2011).

4. EQUIPAMENTOS

A seguir são mostrados os equipamentos utilizados neste estudo: a câmara de distância, o interferômetro *laser*, e o alvo móvel.

4.1. Câmara PMD CamCube 3.0

Foi utilizada uma Câmara PMD CamCube 3.0, mostrada na Figura 4, com fontes de iluminação de LED acopladas nas laterais. Cada uma das fontes de iluminação possui 48 diodos emissores de luz chamados de LEDs (*Light Emitting Diodes*), que emitem luz infravermelha com comprimento de onda de 870 nm. Utiliza um sensor de imageamento PMD (*Photonic Mixer Device*), da empresa PMD Technologies, que consiste em um chip, 200x200 pixels, de tecnologia CMOS padrão, mas com a capacidade de armazenar a distância de cada pixel.

Figura 4 – PMD CamCube 3.0 com iluminação LED nas laterais, sobre tripé.

Fonte: Lichti et. al. (2013).



A distância entre o sensor e o alvo é obtida pelo método da diferença de fase, correlacionando o sinal emitido (modulado em amplitude e frequência) e o sinal de retorno ou refletido (demodulado), assumindo que este sinal de retorno possui a forma senoidal. (OLIVEIRA et. al., 2010). O Quadro 1 apresenta as principais especificações técnicas da PMD Camcube 3.0

Quadro 1 - Principais especificações técnicas da PMD Camcube 3.0.

Fonte: Piatti (2010).

Sensor	CMOS 200 x 200 pixels
Distância focal	12.8 mm
Campo de Visão	40° (h) x 40° (v)
Comprimento de onda da iluminação padrão	870 nm
Range	de 0,3m a 7,5m
Taxa de aquisição de imagens (<i>frame rate</i>)	40 fps
Acurácia absoluta	não disponível
Tamanho do pixel	não disponível

Além das características citadas no Quadro 1, a câmara PMD Camcube 3.0 permite modular o sinal com nas frequências 18 MHz, 19 MHz, 20 MHz e 21 MHz. A amplitude do sinal é modulada em um padrão da câmera, não podendo ser alterada. Mas é possível alterar o tempo de integração da câmara, de 12 a 50000 μ s.

4.2. Interferômetro *Laser*

Para obter um conjunto de medidas de referência com maior exatidão e precisão, foi utilizado um interferômetro *laser* (Hewlett-Packard, Modelo 5508A). Este interferômetro possui trilhos metálicos com, aproximadamente, 4,2 metros de comprimento, sendo capaz de obter medidas com precisão de até 10^{-8} m. Sendo que esta precisão é superior à necessária para as correções das distâncias medidas pela câmara de distância, optou-se por medir com precisão de 10^{-5} m.

4.3. Alvo

O alvo utilizado constituiu-se de uma chapa de madeira compensada, de dimensões 25 x 60 cm, pintada na cor branca. Está apoiado sobre o refletor móvel do interferômetro, sendo possível alterar as distâncias entre a câmara e o alvo.

Experimentos de Lindner e Kolb (2007) e Lindner et. al. (2010) utilizaram um tabuleiro composto de quadrados pretos e brancos, onde foi verificado que a diferença de energia refletida entre os quadrados brancos e os quadrados pretos interfere no cálculo da distância. Isto porque a amplitude do sinal refletido pelos quadrados brancos será maior, e a variação da amplitude causa variação no cálculo da distância. Visto que tal ocorrência não era desejada, optou-se por um alvo de cor única, branca, para possibilitar a mesma reflectância em toda a superfície do alvo.

5. METODOLOGIA

5.1. Aquecimento do sensor da câmera

Estudos de Kahlmann et. al. (2006), Steiger et. al. (2008), Chiabrando et. al. (2009), e Piatti e Rinaudo (2012), entre outros, indicam a necessidade de estabilizar as medições feitas pela câmara, mediante o aquecimento da câmara e do seu sensor.

Caso sejam tomadas imagens antes deste tempo, as medições terão muitas variações, sendo pouco confiáveis.

Segundo estudos de Kahlmann et. al. (2006) com a câmara SwissRanger™ SR-2, depois de passados 04 (quatro) minutos com a câmara ligada, as medições realizadas com a câmara estabilizam, isto é, apresentaram valores com baixa variância. Steiger et. al. (2008), utilizando a câmara SwissRanger SR-3000, também obteve valores estáveis após pouco mais de 4 minutos (250 segundos) de espera. Já Chiabrando et. al. (2009), utilizando uma câmara SwissRanger SR-4000, realizou experimentos onde foram necessários 40 (quarenta) minutos para estabilizar os valores das medições. Piatti e Rinaudo (2012), utilizando a câmara PMD Camcube 3.0, informam que é suficiente aguardar 40 minutos com a câmara ligada para atingir estabilidade nas medições. Sendo assim, a câmara é ligada durante o tempo necessário para estabilizar os valores de distância, daí então se obtém as imagens.

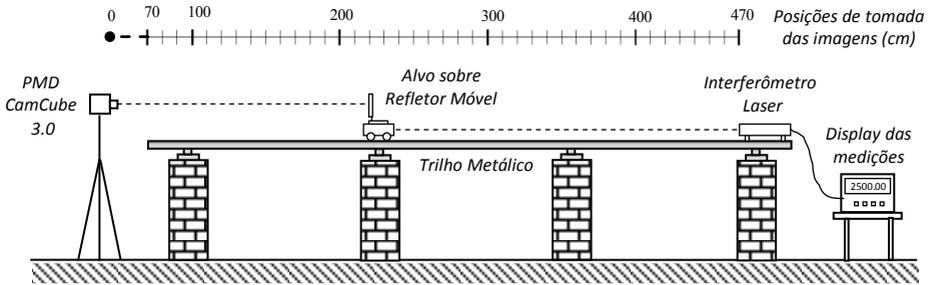
5.2. Tomada de Imagens

Inicialmente espera-se o tempo necessário para estabilizar as medidas obtidas com a câmera. No item 6, "Experimentos e Análise de Resultados", é mostrado um experimento realizado com a câmara PMD para verificar o tempo de aquecimento do sensor.

Com a câmara instalada sobre um tripé foram coletadas imagens de distância do alvo, em distâncias pré-estabelecidas, medidas por meio do interferômetro. A frequência de modulação do sinal infravermelho emitido foi fixada em 20 MHz ($20 \cdot 10^6$ Hz). Foram tomadas imagens em 41 posições sobre um trilho metálico, distantes 10 cm entre si, desde a posição inicial 70 cm até a posição final 470 cm. Em cada posição foram tomadas imagens de distância para tempos de integração (TI) desde $TI=100\mu s$ até $TI=4000 \mu s$, variando a cada $100\mu s$.

Esta grande quantidade de imagens (medidas de distância) possibilita verificar a variação dos erros mais detalhadamente. Também variou-se o tempo de integração para verificar sua influência nas medidas obtidas com a câmara. A Figura 5 mostra um desenho esquemático do experimento, onde se pode observar: as posições da câmara PMD Camcube 3.0 e do interferômetro *laser*; o *display* de medições do interferômetro; o alvo apoiado sobre o refletor móvel; os trilhos metálicos; e uma escala com as 41 posições para tomada de imagens.

Figura 5 - Desenho esquemático da coleta de imagens com a câmara PMD CamCube 3.0, utilizando interferômetro *laser*.

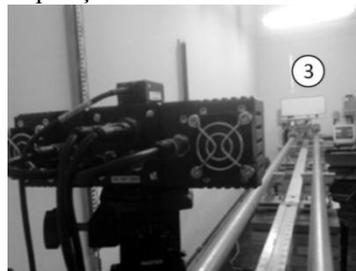
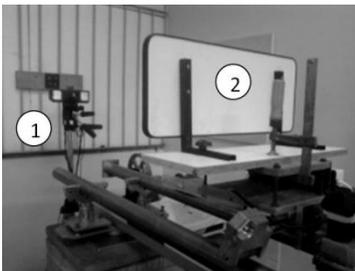


Inicialmente seria analisado apenas o pixel central das imagens. Entretanto, para não depender apenas de um valor de pixel a cada distância – pois este valor pode apresentar maiores erros em relação ao valor real – optou-se por analisar os valores dos pixels de uma janela 7×7 no centro do alvo e a partir deles calcular uma média para cada posição do alvo.

As Figuras 6a e 6b mostram a câmara e o alvo sobre o refletor móvel do interferômetro, que é deslocado ao longo dos trilhos. O processo de medição consiste em posicionar o alvo ao longo dos trilhos, medir a distância de referência usando o interferômetro e obter uma série de imagens para cada posição, variando o tempo de integração.

De posse das imagens, fez-se um programa em ambiente Matlab para leitura de uma região de 7×7 pixels no centro da imagem contendo o alvo. Estes dados foram usados para calcular a média aritmética e o desvio padrão desta região. A média e o desvio padrão tomados nestes 49 pixels servem para se obter um valor de distância mais confiável. Desvio padrão alto indica que algum pixel na janela foi capturado com valor de distância discrepante.

Figura 6 – Fotos do experimento: (1) câmara sobre tripé; (2) alvo sobre o refletor móvel do interferômetro; (3) alvo na posição mais distante.



5.3. Aplicação da Transformada de Fourier e da Função de Correção

Tendo as distâncias medidas em cada posição, utilizou-se a Transformada Discreta de Fourier para determinar as principais frequências sobre os valores dos erros e assim aproximar uma função ao erro cíclico.

A Transformada de Fourier permite analisar uma onda (sinal) qualquer no espaço temporal, decompondo-a em suas componentes harmônicas – seno e cosseno – com suas diferentes frequências e amplitudes no espaço espectral. Aplicando este conceito às funções contínuas, é possível representar uma função de forma aproximada com a combinação de funções harmônicas. Quanto mais harmônicos de diferentes frequências e amplitudes forem considerados, melhor será a aproximação.

A Transformada de Fourier pode ser representada num espaço discreto, sendo conhecida como Transformada Discreta de Fourier. Utilizando um número finito de pontos no domínio do tempo, tem-se uma representação discreta do sinal no domínio da frequência. A função da transformada discreta de Fourier e sua inversa são representadas, respectivamente, pelas Equações 14 e 15:

$$F(f) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} s(t) \cdot e^{-\frac{j2\pi ft}{N}} \quad (14)$$

$$F^{-1}(F(f)) = \sum_{\omega=0}^{N-1} F(\omega) \cdot e^{\frac{j2\pi ft}{N}} \quad (15)$$

ω = frequência angular do sinal, onde $\omega = 2\pi \cdot f$; f = frequência do sinal ;
 e = número de Euler (número neperiano).

A função de correção dos erros é a equação da onda (Equação 16), de movimento harmônico amortecido, pois, como o erro diminui com a distância – isto é, a amplitude é atenuada conforme a distância aumenta – a atenuação desta amplitude foi modelada usando uma função linear (Equação 17). Para isto, considerou-se apenas o valor absoluto dos mínimos e máximos do erro observado e uma reta foi aproximada. Outras funções poderiam ser usadas, porém a função linear foi preferida pelo fato de ter um número reduzido de picos. Finalmente, duas constantes foram estimadas para modelar o deslocamento relativo entre as funções, tanto em amplitude, como em distância.

$$y(x) = c + A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot x + \varphi) \quad (16)$$

$$A(x) = m \cdot x + n \quad (17)$$

onde:

m = declividade da reta; n = constante da reta;

x = posição ou distância; c = constante da onda;
 A = amplitude; f = frequência do sinal; φ = diferença de fase.

6. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente foi realizado um experimento para avaliar o tempo necessário de pré-aquecimento do sensor da câmara. Verificando a variação dos valores da distância em função do tempo de inicialização, é possível determinar o tempo necessário para atingir a estabilização da temperatura do sensor. Para isso, a câmara foi posicionada na frente do alvo e foram monitorados os valores de distância e o desvio padrão da região central da imagem ao longo de uma hora.

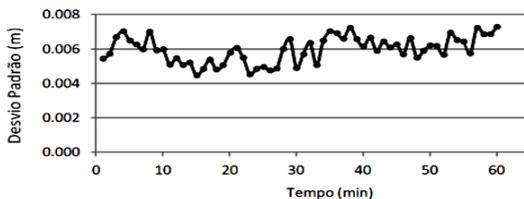
Nota-se na Figura 7, que os valores iniciais da distância são pequenos e eles crescem na medida em que o tempo passa, ou seja, o sensor se aquece. Após 40 minutos, o sensor atinge um estado estável e as medidas de distância não sofrem variações significativas. O mesmo não ocorre com o desvio padrão, o qual se mantém estável ao longo do período de análise, como pode ser visto na Figura 8. Isto indica que a temperatura do sensor não afeta a precisão das medidas, mas sim sua exatidão, gerando estimativas menores que o valor real quando o sensor não está aquecido. Tais resultados concordam com os de Piatti e Rinaudo (2012).

Neste estudo foi efetuado o pré-aquecimento do sensor por aproximadamente 50 minutos. Estabilizada a temperatura do sensor da câmara, iniciou-se a tomada das imagens e a obtenção da distância média da janela central 7x7 pixels, através de programas desenvolvidos em Matlab.



A Figura 7 mostra a variação da distância do pixel central ao longo do tempo e a Figura 8 mostra variação do desvio padrão para o mesmo intervalo.

Figura 8 – Variação do desvio padrão ao longo do tempo.

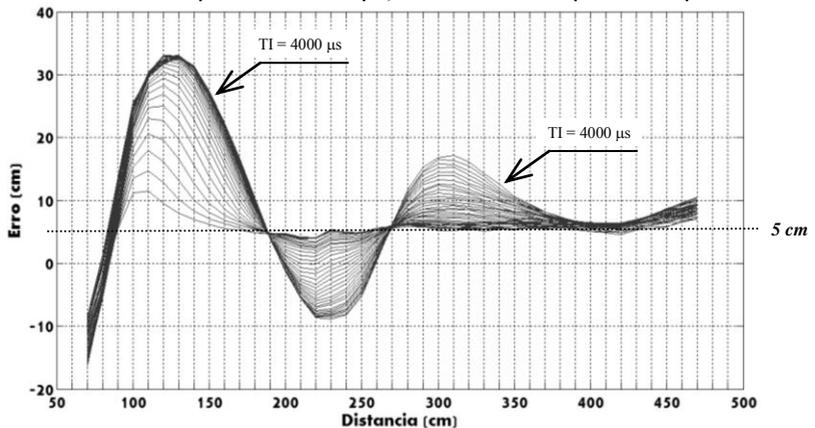


O erro de zero foi calculado para todos os tempos de integração, desde 600 μs até 4000 μs . Para todos os tempo de integração utilizados, o valor do Erro de Zero foi nulo (zero). Assim, a média amostral e o desvio padrão amostral também foram nulos (zero). Realizando um teste estatístico para testar a média populacional, com a curva Z (35 amostras), considerando como hipótese nula (H_0) de que a média do erro de zero é nulo ($m = 0$) para todos os tempo de integração possíveis, não foi possível rejeitar H_0 . Assim, desprezou-se o erro de zero.

O erro de escala, por sua vez, foi desprezado por dois motivos: (1) as medições são consideradas apenas dentro do intervalo de meio comprimento de onda (7,5 m), de modo que a alteração da frequência tem efeito em apenas um ciclo. (2) seria necessário que houvesse um erro da ordem de 2800 ppm na emissão da frequência para que gerasse um erro de 0,14 mm na medição e, frente a precisão da câmara, este valor pode ser desprezado.

A Figura 9 mostra um gráfico da diferença entre a distância medida em relação à distância de referência para os tempos de integração desde 600 μs até 4000 μs . Os tempos de integração entre 100 μs e 500 μs foram desconsiderados devido à iluminação precária (sub-iluminação). Observa-se que, quanto maior o tempo de integração, maiores são os erros associados. Três distâncias se destacam: 95 cm, 190 cm e 270 cm. Nestas distâncias os erros foram os menores para todos os tempos de integração. Na posição 190 cm, por exemplo, o erro médio para todos os tempos de integração é de 4,25cm, com desvio padrão de 0,36cm.

Figura 9 – Gráfico Erro vs. Distância teórica para todos os tempos de integração, desde $TI=600\mu\text{s}$ até $TI=4000\mu\text{s}$, variando de $100\mu\text{s}$ em $100\mu\text{s}$.



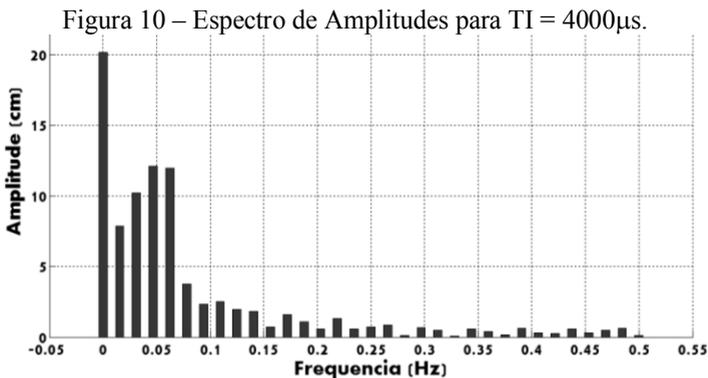
Na Figura 9 é evidente o comportamento cíclico da diferença das distâncias para todos os tempos de integração verificados, com a mesma frequência mas com amplitude variável em função do tempo de integração.

A correção do erro cíclico fará com as amplitudes dos erros recaiam sobre uma linha horizontal distante 5 cm acima do eixo x. Este valor é a constante da equação de compensação do erro na distância, e é decorrente da impossibilidade de se determinar o centro de projeção do sensor.

Dividindo o gráfico da Figura 9 em trechos, tem-se: (a) trechos onde as distâncias calculadas apresentam erros menores que 5 cm: entre 70 cm e 95 cm e entre 190 cm e 255 cm; e (b) trechos onde as distâncias calculadas apresentam erros maiores que 5 cm: entre 95 cm e 190 cm e entre 255 cm e 470 cm.

Também se observou que para tempos de integração entre 2000 μ s e 4000 μ s, entre as distâncias 70 cm e 190 cm, as amplitudes dos erros apresentam valores similares. Desta forma entende-se que, neste intervalo de distâncias, é possível corrigir os erros cíclicos com uma mesma função, qualquer que seja o tempo de integração entre 2000 μ s e 4000 μ s. Para os outros casos, o erro deve ser modelado em função do tempo de integração.

Aplicando a Transformada Rápida Discreta de Fourier (DFFT) na série de erros medidos com tempo de integração 4000 μ s, gerou-se o Espectro de Amplitudes da função no domínio da frequência, conforme é mostrado na Figura 10.



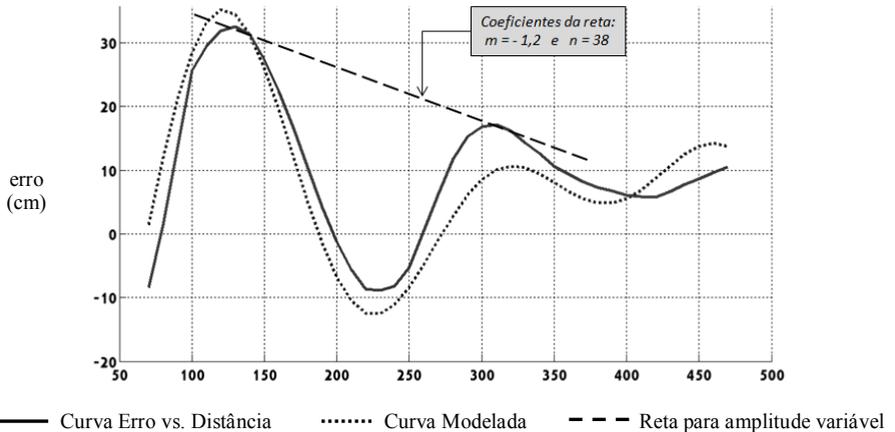
A frequência de maior amplitude tem valor $f = 0,0469$ Hz. Logo, para o tempo de integração 4000 μ s, é nesta frequência que a maior parcela do erro cíclico pode ser compensada. Para qualquer outro tempo de integração deve-se aplicar novamente a Transformada Rápida Discreta de Fourier para obter as suas respectivas frequências e escolher aquela de maior amplitude, que responde pela maior parte do erro cíclico. Pode-se adotar o valor de 5 cm para a constante c , conforme já fora mostrado na Figura 9. De maneira empírica escolheu-se o valor para a diferença de fase como sendo $\varphi = 100$. Para modelar a amplitude variável, utilizou-se uma reta com coeficiente angular $m = -1,2$, cruzando o eixo em $y = 38$ ($n=38$). Esta reta é mostrada na Figura 11. Assim, para TI = 4000 μ s, tem-se as Equações 18 e 19 para compensar o erro cíclico devido a distância câmara-alvo.

$$A(x) = -1,2 \cdot x + 38 \tag{18}$$

$$y(x) = 5 + A(x) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 0,0469 \cdot x + 100) \tag{19}$$

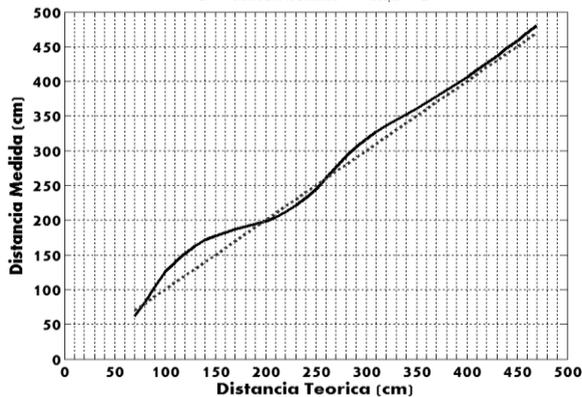
Traçando um gráfico da equação dos erros para TI = 4000 μs e a equação modelada para TI = 4000 μs, tem-se a Figura 11.

Figura 11 – Para TI = 4000 : Curva Erro vs. Distância, Curva modelada, e a Reta de coeficientes m = -1,2 e n = 38 para modelar a Amplitude.



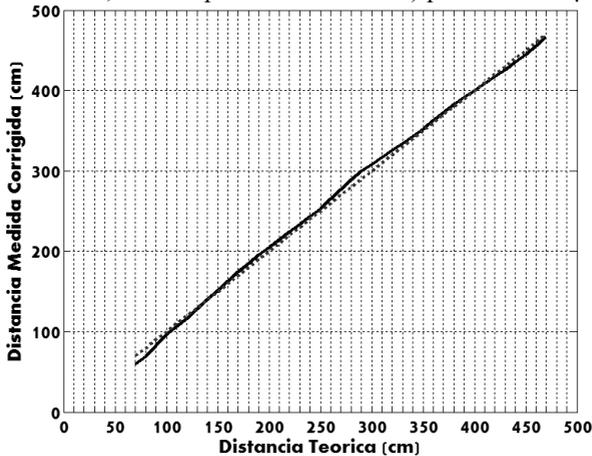
Observando as Figuras 12 e 13 percebe-se a melhora obtida nos valores de distância aplicando o modelo de correção proposto, que reduziu o erro cíclico.

Figura 12 – Relação da distância medida não corrigida e a distância teórica (de referência, medida pelo interferômetro) para TI=4000μs.



O erro médio quadrático (RMSE) antes da modelagem era de 15,01 cm (Figura 12), e após a modelagem diminuiu para 5,05 cm (Figura 13).

Figura 13 – Relação da distância medida corrigida e a distância teórica (de referência, medida pelo interferômetro) para $TI=4000\mu s$.



— Curva de distâncias medidas corrigidas ····· Reta isenta de erros

7. CONCLUSÕES

O experimento realizado com diferentes distâncias e diferentes tempos de integração mostrou a existência de erros sistemáticos na medição de distâncias.

O erro é basicamente cíclico, sendo que os erros de zero e de escala puderam ser desprezados. Este erro cíclico apresentou a mesma frequência, mas com amplitudes variáveis para os tempos de integração a partir de $600\mu s$. Os tempos de integração abaixo de $500\mu s$ foram desconsiderados devido à baixa iluminação captada pelo sensor. Conforme os tempos de integração foram aumentando, o comportamento cíclico dos erros ficou evidente, ao passo que o aumento das amplitudes dos erros garantiu à curva a forma mais senoidal / cossenoidal.

Para tempos de integração entre $2000\mu s$ e $4000\mu s$, entre as distâncias 70 cm e 190 cm, as amplitudes dos erros tiveram variação baixa. Assim, para distâncias pequenas e tempos de integração relativamente altos, apenas a distância teve influência significativa nas amplitudes dos erros.

A modelagem do erro utilizando a Transformada Rápida de Fourier obteve bons resultados, uma vez que para o tempo de integração $4000\mu s$ houve diminuição do erro médio quadrático de 15,01cm para 5,05cm.

Para trabalhos futuros sugere-se a utilização de outra função de modelagem da amplitude amortizada pelo aumento da distância.

8. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro que possibilitou esta pesquisa.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, Dean; HERMAN, Herman; KELLY, Alonzo. Experimental characterization of commercial flash lidar devices. In *Proceedings of International Conference on Sensing Technologies*, New Zealand, November, 2005.
- BECERRO, Frederic Garcia. *External-Self-Calibration of a 3D time-of-flight camera in real environments*. 51p. Dissertação (Mestre Erasmus Mundus em Visão e Robótica – Heriot-Watt University, Scotland, the Université de Bourgogne, France, and the University of Girona, Spain, p. 06, 2008.
- CHIABRANDO, Filiberto; CHIABRANDO, Roberto; PIATTI, Dario; RINAUDO, Fulvio. Sensors for 3D Imaging: Metric Evaluation and Calibration of a CCD/CMOS Time-of-Flight Camera. *Sensors*, v. 9, pp. 10080-10096, 2009.
- FAGGION, Pedro Luiz. *Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório*. 134 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- FALIE, Dragon; BUZULOIU, Vasile. Noise Characteristics of 3D Time-of-Flight Cameras. *IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems*, p. 1 - 4, 13-14 July, Romania, 2007.
- FOIX, Sergi; ALENYA, Guillem; TORRAS, Carme. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: a survey. *IEEE Sensors Journal*, v. 11, n. 3, p. 1-11, 2011.
- FUCHS, Stefan. *Calibration and multipath mitigation for increased accuracy of time-of-flight camera measurements in robotic applications*. 174 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Faculdade de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação, Universidade Tecnológica de Berlim, Berlim, 2012.
- FUCHS, S.; HIRZINGER, G. “Extrinsic and depth calibration of ToF cameras,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Alaska, v. 5, pp. 1–6, 2008.
- HEBERT, Martial; KROTKOV, Eric. 3D measurements from imaging laser radars: How good are they? *International Journal of Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 170-178, April, 1992.
- HUSSMANN, Stephan; HUHNS, P.; HERMANSKI, A. Systematic distance deviation error compensation for a ToF-camera in the close-up range. In *Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1546–1550, Austria, 2012.
- HUSSMANN, Stephan; KNOLL, Florian. Modulation method for minimizing the depth distortion offset of lock-in TOF cameras. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2mtc)*, 2013.

- HUSSMANN, Stephan; KNOLL, Florian; EDELER, Torsten. Modulation method including noise model for minimizing the wiggling error of TOF cameras. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, v. 63, n. 5, 2014.
- KAREL, Wilfried. Integrated range camera calibration using image sequences from hand-held operations. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XXXVIII, Part 5, Beijing, 2008.
- KHALMANN, Timo.; INGENSAND, Hilmar; REMONDINO, Fabio. Calibration for increased accuracy of the range imaging camera Swissranger™. *ISPRS Archives – Volume XXXVI Part 5*, ISPRS Commission V Symposium ‘Image Engineering and Vision Metrology, Dresden, Germany, September p. 136-141, 2006.
- KHALMANN, Timo; REMONDINO, Fabio; GUILLAUME, Sébastien. Range imaging technology: new developments and applications for people identification and tracking. In *Proceedings of Videometrics IX - SPIE-IS&T Electronic Imaging*, v. 6491, 2007.
- KUHNERT, Klaus-Dieter; STOMMEL, Martin - Fusion of stereocamera and PMD-camera data for real-time suited precise 3D environment reconstruction. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4780–4785, 2006.
- KIM, Young Min; CHAN, Derek; THEOBALT, Christian; THRUN, Sebastian. Design and Calibration of a Multi-view TOF sensor fusion system. *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, IEEE Computer Society Conference, p. 1-7, 2008.
- KOLB, Andreas; BARTH, Erhardt; KOCH, Reinhard, LARSEN, Rasmus. Time-of-Flight Cameras in Computer Graphics. *Computer Graphics Forum*, V. 29, 141-149, 2010.
- LANDGATE. *Calibration of Electronic Distance Measurement Instruments*. Western Australian Land Information Authority. 2009. Disponível em: <[http://www.landgate.wa.gov.au/docvault.nsf/web/PS_Survey_EDM_Calibration_Software/\\$FILE/EDMCalibration.pdf](http://www.landgate.wa.gov.au/docvault.nsf/web/PS_Survey_EDM_Calibration_Software/$FILE/EDMCalibration.pdf)>. Acesso em: fevereiro, 2013.
- LANGE, Robert. *3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology*. 139p. Dissertation (Doctor of Technical Sciences). Department of electrical engineering and computer science at University of Siegen, Germany, 2000.
- LICHTI, Derek. Self-calibration of a 3D range camera. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V. XXXVII, Part B5, Beijing, 2008.
- LICHTI, Derek, CHOW, Jacky C. K.; MITISHITA, E.; CENTENO, J.A.S.; SILVA, Felipe M. M.; BARRIOS, Roberto A.; CONTRERAS, Ilich. New Models for Scattering Bias Compensation in Time-of-Flight Range Camera Self Calibration. *Jornal of Surveying Engineering*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2013.

- LINDNER, Marvin; KOLB, Andreas; RINGBECK, Thorsten. New Insights into the Calibration of ToF-Sensors. In *Procedures 22nd IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognition*, v. 1-3, pp. 1603-1607, 2008.
- LINDNER, Marvin; KOLB, Andreas. Calibration of the intensity-related distance error of the PMD TOF-Camera. In: *SPIE – Intelligent Robots and Computer Vision XXV*, p. 6764-35, 2007.
- LINDNER, Marvin; KOLB, Andreas – Lateral and Depth Calibration of PMD-Distance Sensors. In *ISVC, Ed. Springer*, v. 2, p. 524-533, 2006.
- LINDNER, Marvin. “*Calibration and real-time processing of time-of-flight range data*”. Tese de Doutorado, Universidade de Siegen, Alemanha, 2010.
- LINDNER, Marvin; SCHILLER, Ingo; KOLB, Andreas; KOCH, Reinhard. Time-of-flight sensor calibration for accurate range sensing. *Journal Computer Vision and Image Understanding*, v.114, issue 12, p. 1318-1328, Elsevier Science Inc. New York, USA, Dezembro, 2010.
- LIU, Xinquiao. *Cmos image sensors dynamic range and snr enhancement via statistical signal processing*. 139p. Tese (Doutorado em Filosofia) – Department of electrical engineering and the committee on graduate studies of Stanford University , USA, 2002.
- MAIA, Tule César Barcelos. *Estudo e análise de poligonais segundo a NBR 13.133 e o sistema de posicionamento global*. 175p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- MAY, Stefan ; PERVOELZ, Kai; SURMANN, Hartmut. 3D Cameras: 3D Computer Vision of wide scope. *Vision Systems: Applications*, Edited by: Goro Obinata and Ashish Dutta, pp. 181-202, Vienna, Austria, 2007.
- MAY, Stefan; FUCHS, Stefan; DROESCHEL, David; HOLZ, Dirk; NÜCHTER, Andreas. Robust 3D - Mapping with Time-of-Flight Cameras. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 11-15, St. Louis, USA, 2009.
- MÖLLER, Tobias; KRAFT, Holger; FREY, Jochen; ALBRECHT, Martin; LANGE, Robert. Robust 3D measurement with PMD sensors. In: *Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day*, ETH Zurich, Switzerland, 2005.
- OLIVEIRA, Andrey Augusto Alves de. *Modelagem tridimensional de superfícies utilizando imagem ToF - estudo com a câmara PMD Camcube 2.0*. 127p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- OLIVEIRA, Andrey Augusto Alves de; CENTENO, Jorge Antonio Silva; JUTZI, Boris. Tratamento de ruído em imagens de distância obtidas com a câmara PMD[VISION][®] Camcube 2.0. *III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*. Recife - PE, p. 001 - 007, 27-30 de Julho de 2010
- PIATTI, Dario. *Time-of-Flight cameras: tests, calibration and multi-frame registration for automatic 3D object reconstruction*. 160 p. Tese. Doctoral school of Environment and Territory, Politecnico di Torino, Torino, 2010.

- PIATTI, Dario; RINAUDO, Fulvio. SR-4000 and CamCube3.0 Time of Flight (ToF) Cameras: Tests and Comparison. *Remote Sensing*. v. 4, p. 1069-1089, 2012.
- RADMER, J; FUSTE, P.; SCHMIDT, H.; KRUGER, J. Incident light related distance error study and calibration of the PMD-range imaging camera. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. v. 1-3, pp. 1579-1584, Alaska, 2008.
- REYNOLDS, Malcolm; DOBOS, Jozef; PEELY, Leto; WEYRICH, Tim, BROSTOW, Gabriel J. Capturing Time-of-Flight Data with Confidence. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2011, p. 945 - 952, 20-25 June, 2011.
- SABOV, Alexander; KRÜGER, Jörg. Identification and correction of flying pixels in range camera data. *Spring Conference on Computer Graphics (SCCG)*, Slovakia, p. 135 - 142, 2008.
- SHAHBAZI, Mozhdeh; HOMAYOUNI, Saeid; SAADATSERESHT, Mohammad; SATTARI, Mehran. Range camera self-calibration based on integrated bundle adjustment via joint setup with a 2D digital camera. *Sensors*, v. 11, p. 8721-8740, 2011.
- STEIGER, OLIVIER; FELDER, JUDITH; WEISS, STEPHAN. CALIBRATION OF TIME-OF-FLIGHT RANGE IMAGING CAMERAS. *Image Processing. 15th IEEE - ICIP - International Conference On SAN DIEGO, CA, 2008*.
- SURVEYOR-GENERAL VICTORIA. *EDM Calibration handbook - Edition 13*. Published by the Victorian Government Department of Sustainability and Environment. Melbourne. 2012.
- WIEDEMANN, Matthias; SAUER, Markus; DRIEWER, Frauke; SCHILLING, Klaus. Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

(Recebido em março de 2014. Aceito em novembro de 2014).

ORIENTAÇÃO E ORTORRETIFICAÇÃO DE IMAGENS TERRESTRES NADIRAIS

Orientation and orthorectification of nadiral terrestrial images

ADILSON BERVEGLIERI
MARCUS VINÍCIUS ANTUNES DE MORAES
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia – Departamento de Cartografia
UNESP – Univ Estadual Paulista
Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900 Presidente Prudente, SP
{adilsonberveg, antunesdemoraes}@gmail.com, tomaseli@fct.unesp.br

RESUMO

Informações de controle terrestre são fundamentais para as aplicações fotogramétricas. Independentemente do tipo de controle utilizado, um passo interativo é ainda exigido para determinar as coordenadas imagem de pontos de apoio. Esta abordagem propõe uma técnica automática para orientar e ortorretificar imagens terrestres de pontos de apoio. As ortoimagens podem ser utilizadas como cenas de controle em algoritmos de correspondência para orientar imagens aéreas ou orbitais. O método emprega um alvo de controle acoplado a um receptor *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para o levantamento de pontos de apoio. Imagens dos pontos são coletadas em posição nadiral e em diferentes alturas com uma câmara panorâmica. Um modelo multiescala é gerado e orientado usando pontos de enlace e os cantos do alvo como pontos de apoio. As coordenadas 3D destes pontos de enlace são determinadas automaticamente por intersecção de raios. Um Modelo Digital de Terreno (MDT) local é produzido para ortorretificar a área com centro no ponto de apoio. Experimentos foram realizados em pequenas áreas com variações em altitude. As coordenadas geradas automaticamente foram comparadas com amostras coletadas por medições topográficas, e os resultados demonstraram que as áreas foram reconstruídas com erro médio quadrático inferior a 2 cm em altimetria, o que é compatível com a aplicação proposta de geração de cenas de controle.

Palavras-chave: Fotogrametria; Ortoimagem; MDT; Ponto de Apoio; Automação.

ABSTRACT

Ground control information is essential for photogrammetric applications. No matter the type of control, a manual interactive step is still required to locate image coordinates of Ground Control Points (GCPs). This approach proposes an automatic technique to orientate terrestrial images of GCPs and to generate ortho-images. These ortho-images can be used as control scenes in matching algorithms to orientate aerial and orbital images. The method uses a control target attached to the Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver while a GCP is surveyed. GCP images are collected in nadir view and at different heights. A multi-scale model is generated and oriented using tie points and the target as control. The tie point coordinates are automatically determined by intersection of rays. A local Digital Terrain Model (DTM) is produced to orthorectify the area with centre at the GCP. Experiments were performed using small areas with elevation variations. The estimated 3D coordinates were compared to corresponding samples collected by topographic measurements, and the results showed a root mean square errors less than 2 cm in Z coordinate for the reconstructed areas, which is compatible with the target applications.

Keywords: Photogrammetry; Ortho-Image; DTM; Ground Control Point; Automation.

1. INTRODUÇÃO

A principal fonte de controle geométrico em Fotogrametria tem sido os pontos de apoio. O controle de campo é essencial nos processos de orientação de imagens e baseia-se na determinação das coordenadas terrestres de elementos fotoidentificáveis.

Dois tipos principais de pontos de apoio são utilizados: pontos pré-sinalizados e pontos naturais. Os pontos pré-sinalizados são materializados no terreno antes da aquisição das imagens aéreas e permitem a automação do processo de identificação e medição, mas têm como desvantagens o alto custo operacional e a restrição de serem instalados antes da realização do voo. Por outro lado, os pontos naturais são elementos bem definidos existentes na área do projeto, mas podem não ter distinguibilidade comparável aos alvos pré-sinalizados e não estar disponíveis nas regiões adequadas do projeto fotogramétrico. Além disso, a automatização de sua localização e medição na imagem não foi resolvida, exceto em sistemas experimentais com exemplos que serão mostrados na seção 2.

Gülch (1995) relatou os principais problemas para a automatização da medição de pontos de apoio. No caso de pontos pré-sinalizados, foram feitas considerações quanto ao modelo, tamanho, forma, fundo, cor e contraste. Já para pontos naturais, estes devem ser únicos e localizáveis com alta precisão. Estão relacionados com feições antrópicas, como marcas de ruas, quinas de construções, interseções de vias.

Em outros termos, a informação de controle deve ser bem definida em geometria e radiometria, visível em diferentes pontos de vista, ser distinguível e invariante à escala e, ainda, fácil de modelar. Heipke (1997) também fez considerações sobre orientação de imagens para a determinação de Parâmetros de Orientação Exterior (POEs). Algumas importantes condições sobre as fontes de controle foram levantadas e apresentam similaridade com os requisitos previamente apresentados.

Geralmente, os processos manuais interativos ainda são empregados para medir coordenadas imagem de pontos de apoio, o que consome muito tempo, além de proporcionar erros devido à capacidade limitada do operador para interpretar a localização exata dos pontos nas imagens.

Para resolver este problema, propõe-se uma abordagem automática de orientação e geração de cenas terrestres de controle, sem a necessidade de interação de um operador para medir pontos nas imagens. O processo engloba a reconstrução, geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT) local, ortorretificação e o georreferenciamento aproximado de imagens terrestres nadirais contendo pontos de apoio.

Com este propósito, uma técnica de coleta de dados foi especialmente desenvolvida para adquirir imagens terrestres nadirais de áreas distinguíveis, usando diferentes alturas para formar um modelo multiescala. Operacionalmente, a técnica, planejada para ser prática e eficiente, não aumenta o tempo de levantamento de campo e utiliza dispositivos de baixo custo.

Objetivamente este artigo introduz um processo automatizado que extrai coordenadas terrestres de alvos, orienta modelos multiescalas e ortorretifica imagens. Uma avaliação também é realizada sobre a reconstrução das coordenadas terrestres em duas pequenas áreas. Como resultado, um elemento de controle terrestre é gerado automaticamente e sem medições manuais. As ortoimagens produzidas podem ser usadas, por exemplo, na orientação de imagens aéreas por meio de algoritmos de correspondência, como apresentado por Berveglieri e Tommaselli (2013, 2014).

Na sequência, relatam-se alguns tipos de elementos de controle usados em Fotogrametria e apresenta-se o método desenvolvido com sua aplicação, resultados e avaliação.

2. TIPOS DE CONTROLE TERRESTRE

Na literatura fotogramétrica, diversos tipos de elementos de controle têm sido estudados para os processos de orientação exterior de imagens aéreas ou orbitais. De acordo com Jaw e Wu (2006), além de pontos, outras entidades foram comumente empregadas, como linhas, áreas e estruturas.

Segundo Schenk (2004), a ideia de usar feições como informação de controle em Fotogrametria foi introduzida por Lugnani (1980), o qual demonstrou o uso de feições lineares. Tommaselli e Lugnani (1988) e Tommaselli e Tozzi (1996) utilizaram linhas retas, ao passo que Mulawa e Mikhail (1988) incluíram também as seções cônicas. Outros trabalhos sobre feições lineares também podem ser

encontrados em Habib e Morgan (2003), Tommaselli e Medeiros (2010) e Marcatto Junior e Tommaselli (2013).

Uma das primeiras abordagens utilizando recortes de imagens georreferenciadas foi proposta por Malmström (1986), denominando-os de *Ground Control Chip* (GCC). O autor utilizou recortes de imagens aéreas de alta resolução para orientar uma imagem de satélite por meio de técnicas de correspondência de imagens baseadas em área.

Drewniok e Rohr (1996) testaram tampas de bueiros como entidades de controle, utilizando um modelo padrão para a correspondência de imagens. Fraser et al. (2001) usaram rotatórias urbanas para avaliar a triangulação de imagens orbitais. Os centroides foram medidos nas imagens e determinados por GPS em campo.

Läbe e Ellenbeck (1996) aplicaram modelos de estruturas 3D de construções como controle para a produção automática de mapas de ortofotos digitais, calculando a orientação exterior por ressecção espacial.

Jaw e Wu (2006) empregaram um banco de recortes de imagens no qual pontos de controle foram localizados em imagens existentes e correlacionados com outras imagens.

Tournaire et al. (2006) propuseram uma abordagem que tem, como controle de campo, faixas de pedestres imageadas por sistemas de mapeamento móvel. A abordagem usou imagens aéreas de alta resolução para gerar um banco de dados de objetos em comum entre imagens aéreas e terrestres.

Li et al. (2013) apresentaram um trabalho sobre o registro de imagens aéreas e dados *Light Detection And Ranging* (LIDAR) aerotransportados em regiões de deserto. Foram utilizados arbustos existentes no deserto como primitivas de registro. Extraíram-se os centroides desses arbustos para gerar triângulos semelhantes, os quais serviram como características na correspondência entre imagens. A semelhança entre os triângulos foi analisada por lado-ângulo-lado, e a verificação do registro baseou-se no algoritmo *RANdom SAmple Consensus* (RANSAC).

Essas abordagens previamente apresentadas têm como fatores limitantes, conforme a entidade de controle, a existência da feição de interesse na área do projeto, a disponibilidade de ortoimagens para a área de mapeamento e a dependência pelo nível de resolução e precisão das imagens de referência.

Berveglieri e Tommaselli (2013) apresentaram uma técnica para orientação de imagens aéreas baseada em imagens terrestres de pontos de apoio (de alta resolução), que foram coletadas em campo para extrair recortes georreferenciados para a correspondência com imagens aéreas. Nos experimentos, os pontos de apoio foram localizados automaticamente com precisão subpixel por técnicas de correlação baseada em área e ajustamento por mínimos quadrados. Embora a técnica tenha demonstrado melhorias significativas quando comparada aos métodos tradicionais de medição de pontos, o passo para medir o ponto de apoio nas imagens terrestres ainda era interativo. Para resolver este problema, introduz-se, neste trabalho, uma técnica que gera a cena de controle automaticamente, e a área do

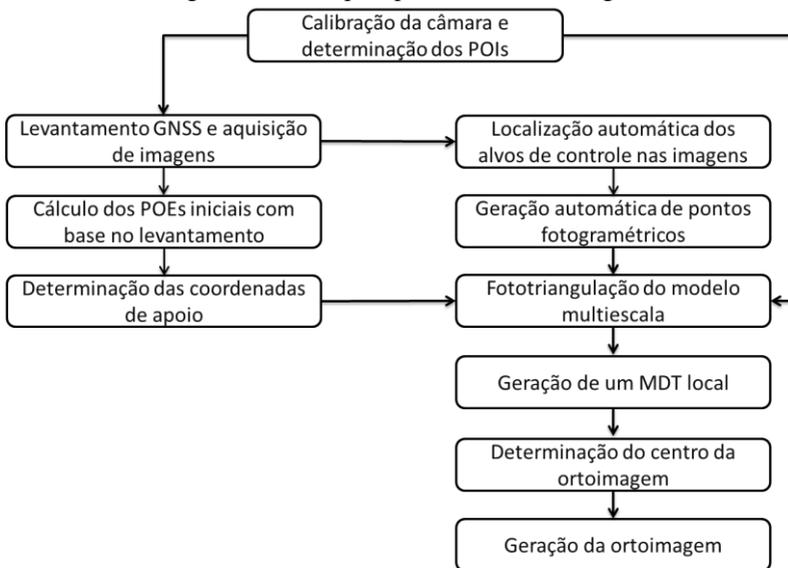
entorno do ponto de apoio pode ser usada como controle para orientar imagens aéreas.

3. MÉTODO AUTOMÁTICO PARA A ORIENTAÇÃO E GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS TERRESTRES DE CONTROLE

O método proposto utiliza um fluxo completo, desde a orientação à ortorretificação, sem a intervenção de um operador para determinar pontos de apoio nas imagens. Para isso, primeiramente as imagens terrestres devem ser adquiridas com as características específicas da técnica proposta.

A Figura 1 mostra os passos mais importantes do desenvolvimento metodológico. Em termos gerais, quatro etapas foram organizadas para explicar a técnica: (1) processo de calibração da câmara com lente supergrande angular; (2) apoio de campo e forma de aquisição das imagens; (3) orientação das imagens considerando diferentes escalas e, por fim, (4) processo de ortorretificação das regiões dos pontos de apoio.

Figura 1 – Principais passos da metodologia.



3.1 Calibração do Sistema Câmera-Lente

A determinação dos Parâmetros de Orientação Interior (POIs) é feita por um procedimento realizado em campo de calibração terrestre. Em geral, são determinados a distância focal, as coordenadas do ponto principal e os coeficientes de distorção das lentes. O modelo matemático comumente empregado para

reconstruir a geometria dos raios no interior da câmara baseia-se nas equações de colinearidade (Equação 1) (MIKHAIL et al., 2001), com acréscimo dos parâmetros de distorção das lentes.

$$F_1 = x_f - x_0 - \delta x_r - \delta x_d - \delta x_a + f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0$$

$$F_2 = y_f - y_0 - \delta y_r - \delta y_d - \delta y_a + f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0$$
(1)

Em que: x_f e y_f são as coordenadas no espaço imagem; (X, Y, Z) são coordenadas do mesmo ponto no espaço objeto; m_{ij} são os elementos da matriz de rotação; (X_0, Y_0, Z_0) são as coordenadas do centro perspectivo da câmara; (x_0, y_0) são as coordenadas do ponto principal; f é a distância focal e δx_i e δy_i representam os efeitos das distorções radial e descentrada e modelo de afinidade.

A lente usada para adquirir imagens é uma supergrande angular do tipo *fisheye*. Sua geometria tem características particulares que não seguem as condições de colinearidade, exigindo modelagem específica. Para este trabalho, utilizou-se o modelo equidistante (Equação 2) (SCHNEIDER et al., 2009), com adição do modelo de distorção Conrady-Brown (BROWN, 1971).

$$x' = x_0 + \delta x_r + \delta x_d + \delta x_a - f \cdot \frac{X_0}{\sqrt{X_0^2 + Y_0^2}} \cdot \arctan \left(\frac{\sqrt{X_0^2 + Y_0^2}}{Z_0} \right)$$

$$y' = y_0 + \delta x_r + \delta x_d + \delta x_a - f \cdot \frac{Y_0}{\sqrt{X_0^2 + Y_0^2}} \cdot \arctan \left(\frac{\sqrt{X_0^2 + Y_0^2}}{Z_0} \right)$$
(2)

O sistema de equações linearizadas a partir da (Equação 2) pode ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados, considerando algumas restrições sobre as coordenadas objeto dos pontos medidos ou observações dos POEs.

A lente supergrande angular é necessária para se obter uma visão ampla, cobrindo as principais características da cena. O processo rigoroso de calibração é fundamental para permitir a correção dos efeitos de distorção radial, próprios da lente *fisheye*, e do posicionamento da câmara.

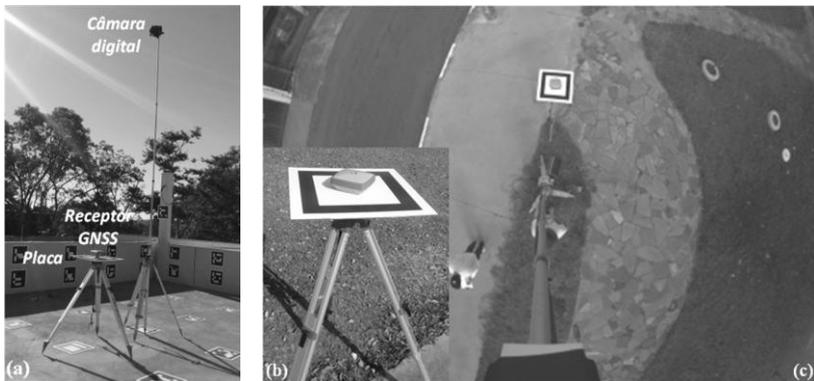
3.2 Levantamento GNSS e Aquisição de Imagens Verticais Multiescalas

Primeiramente, seleciona-se o local para a coleta do ponto de apoio seguindo os procedimentos convencionais de levantamento: áreas com pontos e feições fotointerpretáveis e abertas (sem obstruções) para evitar problemas na recepção do

senal *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e multicaminho. Estas condições favorecem também a aquisição de imagens, evitando problemas com alguma oclusão de objetos.

Após definida a área, uma placa branca (50 × 50 cm) contendo um alvo quadrado em preto é colocada e nivelada sobre um tripé e sob a antena do receptor GNSS, como mostram as Figuras 2(a) e (b). Este conjunto de levantamento é posicionado para coletar sinais GNSS sobre uma feição natural bem definida ou sobre uma área que possua em sua vizinhança elementos fotointerpretáveis. Próximo ao receptor, um segundo tripé é posicionado para adquirir imagens com a câmara *fisheye* em posição nadiral. A Figura 2(c) mostra um exemplo de imagem *fisheye* adquirida verticalmente com o conjunto montado.

Figura 2 – (a) Dispositivos para aquisição de imagens *fisheye* em posição vertical e levantamento de ponto de apoio; (b) Placa com o alvo de controle sob a antena GNSS; (c) Um exemplo de imagem vertical *fisheye*.



O procedimento de coleta de imagens e sinais GNSS está ilustrado na Figura 3. Depois de posicionada e nivelada, a placa de controle é alinhada perpendicularmente em relação ao tripé da câmara. O azimute aproximado pode ser medido com uma bússola ou magnetômetro. Enquanto ocorre o rastreamento GNSS, quatro imagens em uma posição planimétrica similar são adquiridas, variando-se apenas a altura da câmara. Esta aquisição acontece da seguinte forma:

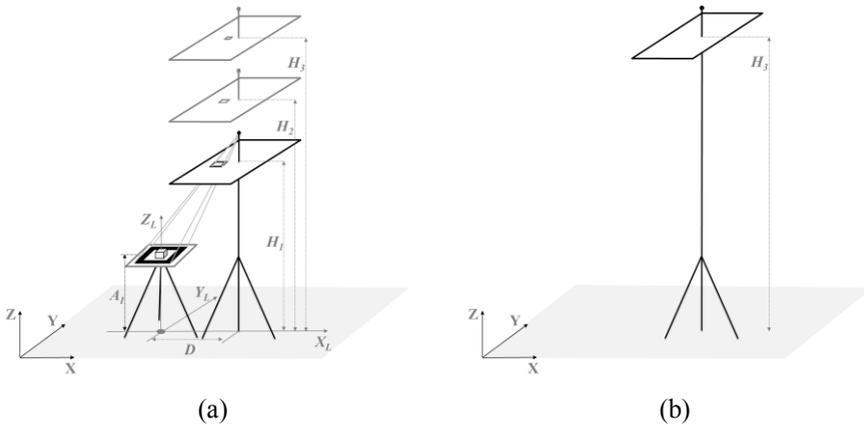
- Três imagens contendo a placa de controle são tomadas em diferentes alturas, como ilustrado na Figura 3(a);
- Uma quarta imagem, na posição mais alta, é adquirida para ser ortoretificada, sem a presença da placa de controle, rastreador e tripé (ver Figura 3(b));

A definição da necessidade de três alturas foi previamente analisada em campo de calibração, e três imagens foram suficientes para garantir robustez e qualidade geométrica (TOMMASELLI e BERVEGLIERI, 2014). O uso de uma quantidade maior de imagens não produziu melhora significativa. Durante as aquisições, são

anotadas as medidas de distâncias relativas entre o eixo de centragem do tripé GNSS e o eixo do bastão da câmara (distância D) e as alturas (A_1 e H_j).

Figura 3 – (a) Aquisição de três imagens multiescalas registrando a placa de controle. (b) Quarta imagem na posição mais alta e sem a placa de controle.

Fonte: Tommaselli e Berveglieri (2014).



O posicionamento dos dispositivos e as medições relativas definem um sistema local (X_L, Y_L, Z_L) , que pode ser transformado para outro sistema (X, Y, Z) , como, por exemplo, para coordenadas geográficas ou coordenadas planas (E, N, h) no sistema *Universal Transverse Mercator* (UTM). Neste caso, o azimute deve ser corrigido em relação à declinação magnética e à convergência meridiana, ou deve ser calculado com base em uma segunda posição fornecida.

3.3 Fototriangulação do Modelo Multiescala

Para realizar a fototriangulação das imagens, são necessários: POIs calibrados, POEs como aproximações iniciais, pontos de apoio e coordenadas imagem como observações.

Os POIs são previamente determinadas pelo processo de calibração da câmara, e os POEs iniciais de posição são medidos diretamente e usados como injunções com base nas medidas anotadas em campo durante a aquisição dos dados. Os POEs de atitude entram na fototriangulação como incógnitas.

Uma vez que o centro da placa tem sua coordenada terrestre definida pelo levantamento GNSS, os oito cantos do alvo quadrado (bordas externa e interna) passam a ter também suas coordenadas conhecidas e são usadas como pontos de apoio para orientar as imagens. Em cada imagem, o alvo de controle é automaticamente identificado por um detector de contornos retangulares, e seus vértices são extraídos (com precisão subpixel) por intersecção de linhas, como mostrado em Garrido-Jurado et al. (2014).

As quatro imagens são usadas no processo de ajustamento por feixe de raios para estimar os POEs das imagens. A quarta imagem não possui alvos de controle, mas se conecta com as demais pelos pontos de enlace. Um modelo multiescala é então formado, e todas as imagens são conectadas entre si por meio de pontos de enlace, proporcionando mais consistência e rigidez geométrica na estimativa dos POEs. Tais pontos de enlace são determinados automaticamente usando a técnica *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT).

SIFT é uma técnica de processamento de imagens que extrai automaticamente características distinguíveis baseadas em informações de gradientes locais. Essas características são parcialmente invariantes a mudanças de escala, rotação, iluminação e ponto de vista da câmara. As características extraídas são armazenadas em vetores descritores, e a comparação entre descritores de duas ou mais imagens permite estabelecer a correspondência de imagens. Detalhes sobre a técnica SIFT são apresentados por Lowe (1999, 2004).

É importante ressaltar que o feixe de raios fornecido pela placa de controle nas imagens não tem uma geometria adequada para realizar a orientação completa do modelo. Porém, a orientação é válida para a parte central das imagens, a qual consiste na área do ponto de apoio e abrange as principais características da cena, favorecida pelo posicionamento em campo.

Um estudo para avaliar a acurácia e o alcance desse tipo de orientação foi previamente realizado por Tommaselli e Berveglieri (2014). Demonstrou-se em um campo de calibração, com precisão topográfica de 3 mm, que áreas de até 20 m² podem ser reconstruídas pela técnica proposta com discrepâncias menores do que 2 cm. Isto é suficiente para o propósito de gerar cenas de controle, já que os levantamentos tradicionais de pontos de apoio têm acurácia inferior a esse valor.

3.4 Geração da Ortoimagem

A partir da fototriangulação do modelo multiescala, produtos como MDTs e ortoimagens podem ser gerados. O tamanho do produto depende do nível de precisão a ser atendido, pois a qualidade da orientação tem degradação radial em relação ao centro do alvo de controle. No caso deste estudo, áreas de 20 m² são suficientes para a correspondência com imagens aéreas de até 20 cm de *Ground Sample Distance* (GSD), considerando um levantamento de campo com desvio-padrão de 5 cm. Para erros maiores, áreas maiores também podem ser reconstruídas.

3.4.1 Geração de um MDT Local

Como já apresentado, os feixes de raios das quatro imagens são ajustados simultaneamente, ligados por pontos de enlace comuns que são determinados por SIFT, os quais podem variar em quantidade conforme as feições da área. Na fototriangulação do modelo multiescala, todos os pontos de enlace têm suas coordenadas determinadas no espaço objeto por intersecção fotogramétrica, gerando uma nuvem de pontos 3D.

Originalmente as imagens terrestres são obtidas com GSD entre 2 e 3 mm, de acordo com a altura de aquisição e a distância ao centro da imagem. Esta alta resolução possibilita produzir MDTs locais também com alta resolução, ou gerá-los diretamente para outros GSDs.

Por definição, um MDT deve considerar apenas elementos do terreno. Embora a quarta imagem não contenha o alvo de controle, o tripé e o bastão da câmara ainda estão presentes na imagem. Porém, o posicionamento feito em campo entre os tripés GNSS e câmara favorece que a área de interesse seja sempre visível, sem obstruir as características mais importantes da cena. Assim, a porção da imagem em que tripé e bastão aparecem não produz prejuízos aos propósitos da técnica. Ambos são excluídos usando uma máscara previamente definida, uma vez que esses elementos sempre aparecem na posição centro-inferior da cena. Isto garante que os dispositivos utilizados para coletar dados não contaminem a geração do MDT.

O processo de produção do MDT segue os procedimentos tradicionalmente conhecidos, como pode ser consultado em Mikhail et al. (2001). Gera-se uma grade regular, conforme as dimensões da área e a resolução pretendida, e aplica-se uma interpolação na grade com base nas coordenadas da nuvem de pontos 3D dos pontos de enlace.

3.4.2 Geração de uma Ortoimagem Local

A geração da ortοimagem pode ser feita para uma imagem completa ou para parte dela, como é o interesse deste trabalho, o qual objetiva produzir recortes de imagens terrestres ortorretificadas.

Inicialmente, o procedimento de geração da ortοimagem requer POIs calibrados, o MDT local e a imagem original para ser ortorretificada com seus respectivos POEs.

A finalidade é que seja reconstruída a área circundante ao ponto de apoio. Por isso, a coordenada levantada em campo com receptor GNSS é fornecida para ser localizada no MDT local e determinar o centro de geração da ortοimagem.

De acordo com as dimensões das áreas dos pontos de apoio e da resolução do MDT local, a ortοimagem é produzida. O procedimento adotado usa o método indireto (MIKHAIL et al., 2001) com uma adaptação para gerar a ortοimagem em torno do ponto GNSS levantado. Para cada ponto da ortοimagem no referencial do espaço objeto, faz-se a busca do tom de cinza do pixel correspondente na imagem de entrada seguindo os passos:

1. Projeção das coordenadas (X, Y, Z) do MDT local para o espaço imagem usando o modelo equivalente (Equação 2). A coordenada GNSS do ponto de apoio (centro da placa de controle) também é projetada para definir o centro da ortοimagem;
2. Mapeamento inverso conforme o modelo de distorção das lentes para o sistema fotogramétrico distorcido;
3. Determinação da posição no sistema imagem (coluna, linha) com base nas informações da câmara;

4. Interpolação do tom de cinza a partir dos pixels vizinhos na imagem original.

No final, tem-se a região do ponto de apoio ortorretificada, podendo ser usada como cena de controle.

4. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

A metodologia proposta foi implementada e testada em situações reais para avaliar todo o processo automático de orientação e geração de ortoimagens em regiões de pontos de apoio.

Observando o espaço abrangido pelas imagens terrestres, se as áreas dos pontos de apoio forem formadas por regiões quase planas, com suaves variações de altitude, um processo de ortorretificação apresenta poucas diferenças sobre a correção dos efeitos do relevo provocados na imagem. Neste caso, a imagem original poderia simplesmente ser reamostrada para um plano, considerando uma mesma escala, o que dispensaria a necessidade de um MDT para ortorretificação. A reamostragem é realizada apenas para corrigir os efeitos resultantes da geometria *fisheye* e do posicionamento da câmara, gerando uma imagem retificada.

Por outro lado, se algumas variações altimétricas ou, principalmente, inclinações estiverem presentes, então a ortorretificação torna-se necessária para corrigir os efeitos do relevo na imagem. Por isso, considerando este segundo caso, duas áreas com inclinação e algumas variações de altitude na superfície foram selecionadas para serem reconstruídas e avaliadas no espaço objeto. Na sequência, essas áreas serão mostradas, bem como os procedimentos adotados e os resultados alcançados.

4.1 Realização dos Experimentos

As imagens para os experimentos foram adquiridas por uma câmara digital com lente *fisheye*. A Tabela 1 fornece os detalhes técnicos do sistema usado para adquirir imagens.

Tabela 1 – Especificações técnicas do sistema de aquisição de imagens.

Modelo da câmara	Nikon D3100
Tamanho do sensor	CMOS APS-C (23,1 × 15,4 mm)
Dimensões da imagem	4608 × 3072 pixels (14,2 megapixels)
Tamanho do pixel	0,005 mm
Distância focal nominal	8,0 mm (Bower SLY 358N)

A calibração da lente *fisheye* foi realizada em um campo de calibração terrestre 3D, localizado na FCT/UNESP em Presidente Prudente/SP. O campo possui 139 alvos com codificação ARUCO (GARRIDO-JURADO *et al.*, 2014), como mostra a Figura 4. Este tipo de codificação possibilita identificar os alvos e medir as coordenadas dos cantos para serem usadas como controle no ajuste de feixe de raios na calibração do sistema câmara-lente.

Um programa computacional de localização de alvos ARUCO, usando biblioteca OpenCV, foi adaptado por Silva et al. (2014) para calibração de câmaras. Os quatro cantos de cada alvo foram automaticamente localizados e medidos nas imagens, fornecendo suas respectivas coordenadas terrestres. Do mesmo modo, o alvo da placa de controle também foi planejado para ser identificado automaticamente.

Figura 4 – Exemplo de uma imagem *fisheye* com alvos ARUCO usada para calibração da câmara.



A partir das coordenadas identificadas, os POIs foram determinados usando o software *Calibration with Multiple Cameras* (CMC), desenvolvido por Ruy et al. (2009), com adaptação feita por Tommaselli et al. (2014) para o modelo equidistante, apropriado para a lente *fisheye*. Os valores dos POIs estimados pelo processo de calibração estão apresentados na Tabela 2. Para mais detalhes sobre essa calibração, ver Tommaselli e Berveglieri (2014).

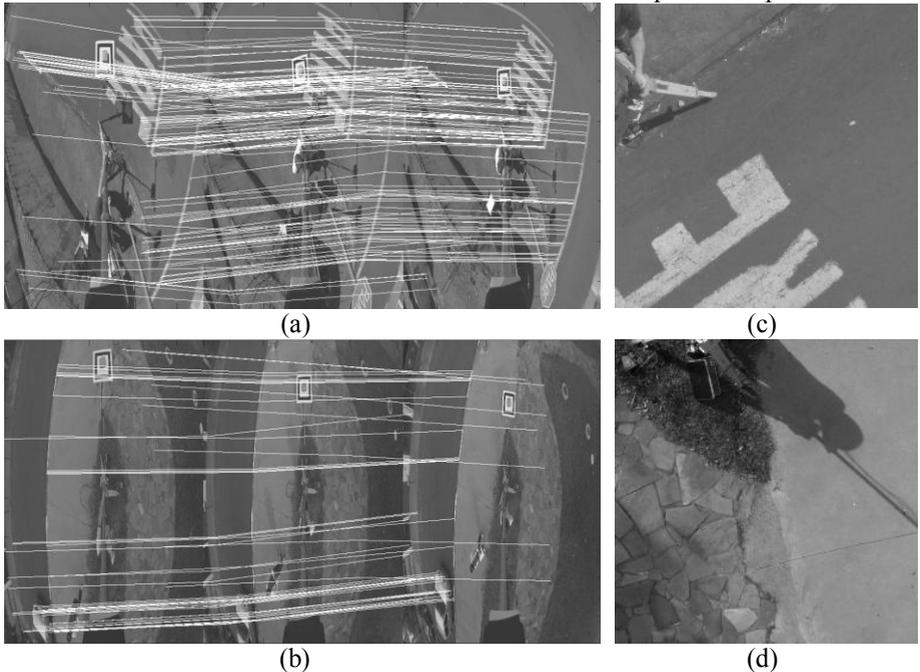
Tabela 2 – POIs estimados pelo processo de calibração usando ajuste de raios com o modelo equidistante.

Parâmetro	Valor estimado	Desvio-padrão estimado
f (mm)	8,3794	0,0011 ($\pm 0,23$ pixels)
x_0 (mm)	0,0729	0,0011 ($\pm 0,22$ pixels)
y_0 (mm)	0,0019	0,0009 ($\pm 0,18$ pixels)
K_1 (mm^{-2})	$4,20 \times 10^{-4}$	$3,77 \times 10^{-6}$
K_2 (mm^{-4})	$8,20 \times 10^{-7}$	$6,32 \times 10^{-8}$
K_3 (mm^{-6})	$-2,54 \times 10^{-9}$	$3,12 \times 10^{-10}$
P_1 (mm^{-1})	$4,84 \times 10^{-6}$	$1,63 \times 10^{-6}$
P_2 (mm^{-1})	$-2,28 \times 10^{-7}$	$1,67 \times 10^{-6}$
A	$3,34 \times 10^{-5}$	$1,88 \times 10^{-5}$
B	$-7,43 \times 10^{-4}$	$3,58 \times 10^{-5}$
σ a posteriori	0,0054 (≈ 1 pixel)	

Na aquisição das imagens das duas áreas de estudo, as alturas da câmara variaram em torno de: 3,1 m; 3,7 m e 4,4 m (alturas medidas com distanciômetro eletrônico), ressaltando-se que a terceira e quarta imagens são adquiridas na mesma altura. A definição destes valores aproximados teve como base os experimentos realizados por Tommaselli e Berveglieri (2014) no campo de calibração. Para o levantamento das coordenadas dos pontos de apoio, um receptor GNSS (Hiper SR – Topcon) de dupla-frequência foi usado.

O conjunto de imagens de cada ponto de apoio forma um modelo multiescala. Assim, a técnica SIFT foi aplicada sobre cada modelo para gerar pontos de enlace automaticamente, e os resultados da correspondência aparecem nas Figuras 5(a) e (b) para ambas as áreas, considerando as imagens de controle, as quais também tiveram os cantos da placa de controle localizados por processamento de imagens. Na correspondência SIFT, possíveis falsas correspondências foram eliminadas usando uma filtragem combinada com transformação de Helmert e *majority voting*, implementada por Berveglieri e Tommaselli (2014).

Figura 5 – Pontos de enlace entre as três imagens do modelo com a placa de controle. São mostradas as regiões: (a) Área I; (b) Área II; (c) e (d) Respectivas áreas ortorretificadas com GSD de 1 cm e centro no ponto de apoio.



As coordenadas imagem de cada imagem foram inseridas no projeto fotogramétrico como observações para processar a triangulação pelo programa CMC. Nesse procedimento de fototriangulação, definiu-se, no espaço imagem, o desvio-padrão de $\sigma = 0,5$ pixel para as coordenadas imagem. Em relação ao espaço objeto, as coordenadas de apoio sobre a placa de controle (oito cantos), por serem conhecidas com precisão, foram fixadas por injunções com desvio-padrão de $\sigma = 0,0005$ m. Os valores iniciais dos POEs foram definidos com base na determinação direta das medidas obtidas em campo, sendo fixados por injunções relativas com desvios-padrão de: $\sigma = 30^\circ$ para a atitude, que não afeta significativamente os resultados; e devido aos movimentos e deslocamentos para levantar a câmara, $\sigma = 0,10$ m para a posição XY e $\sigma = 0,005$ m para Z. Usando fototriangulação por feixes de raios, cada modelo multiescala foi ajustado, resultando nos sigmas *a posteriori* de $\hat{\sigma}_0 = 0,0096$ (< 2 pixels) e $\hat{\sigma}_0 = 0,0137$ (< 3 pixels) para as Áreas I e II, respectivamente, sendo que o sigma *a priori* atribuído foi de $\sigma_0 = 0,0142$ (~ 3 pixels), devido aos efeitos de borramento da lente *fisheye*.

As coordenadas terrestres dos pontos de enlace da região do ponto de apoio foram determinadas por interseção fotogramétrica no espaço objeto, gerando uma nuvem de pontos. Para cada área, a partir das nuvens geradas, interpolou-se um MDT local em forma de grade regular a com elemento de resolução de grade regular de 1 cm. A técnica de interpolação usada foi a ponderação pelo inverso do quadrado da distância. Outro espaçamento também poderia ser utilizado, uma vez que as imagens originais possuem GSD entre 2 e 3 mm. Entretanto, definiu-se a resolução em 1 cm apenas por uma questão prática, permitindo facilmente a subamostragem da imagem para qualquer outro GSD.

Desse modo, utilizando-se o procedimento descrito na seção 3.4, a ortoimagem foi produzida segundo as dimensões da área de interesse. As Figuras 5(c) e (d) apresentam as ortoimagens geradas com o ponto de apoio no centro.

É recomendado produzir uma ortoimagem com alta resolução (por exemplo, GSD de 1 cm) para depois subamostrá-la para outras resoluções (GSD de 3 cm, 4 cm ou maior). Experimentalmente, verificou-se que a geração de uma ortoimagem diretamente na resolução pretendida (GSD de 3 cm, 4 cm ou maior) resultou em uma qualidade inferior em comparação com a mesma imagem produzida com elemento de resolução de 1 cm e, posteriormente, subamostrada para aqueles GSDs.

4.2 Validação das Ortoimagens e Análise dos Resultados

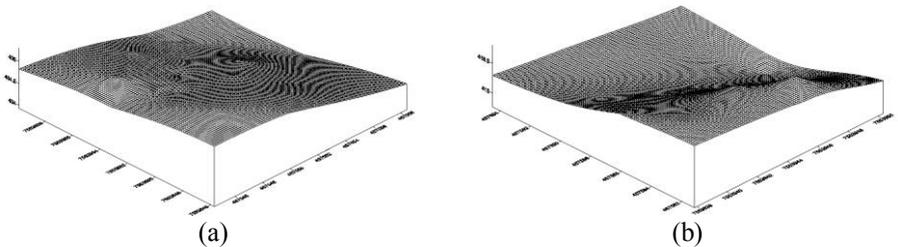
Para validar as ortoimagens locais, conduziu-se um levantamento topográfico por nivelamento trigonométrico para se obter amostras discretas das altitudes das áreas experimentais. A escolha do método adotado foi devido às pequenas dimensões das áreas.

Em campo, posicionou-se no mesmo ponto de levantamento GNSS uma estação total (Topcon GPT-7005) para fazer o levantamento por irradiação de pontos no entorno, os quais eram ocupados por um bastão com prisma refletor. A

região do ponto de apoio (área com cerca de 5×5 m) foi levantada, coletando-se coordenadas de pontos com espaçamento de 0,5 ou 1 m, no máximo. A Figura 6 exibe a variação da superfície das duas áreas de teste, a partir do levantamento de campo.

Como já mencionado, devido ao tipo de geometria da placa de controle, que é posicionada para a parte central das imagens, apenas o entorno dos pontos de apoio é reconstruído. Não é finalidade reconstruir todo o espaço coberto pelo modelo multiescala, pois as áreas de interesse apresentam dimensões de 2×2 m ou 3×3 m e são recortadas e usadas como *templates* ou *chips* de imagens.

Figura 6 – MDTs das áreas de teste com tamanho aproximado de 5×5 m. (a) Área I e (b) Área II.



Pelo fato dos pontos de enlace serem determinados automaticamente e não serem necessariamente cantos, sua localização exata em campo não é possível. Desse modo, as coordenadas topograficamente medidas foram interpoladas para as mesmas posições das coordenadas 3D geradas pela triangulação do modelo. As diferenças entre as coordenadas trianguladas e as interpoladas possibilitaram uma avaliação sobre a qualidade do MDT local e da ortoimagem.

As amostras de campo foram interpoladas espacialmente usando a média ponderada das quatro amostras mais próximas ao ponto em análise. Os pesos foram definidos baseados no inverso do quadrado da distância, e um cálculo de discrepâncias foi realizado considerando as coordenadas topográficas interpoladas como referência. A partir disso, calculou-se a Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) das altitudes dos pontos.

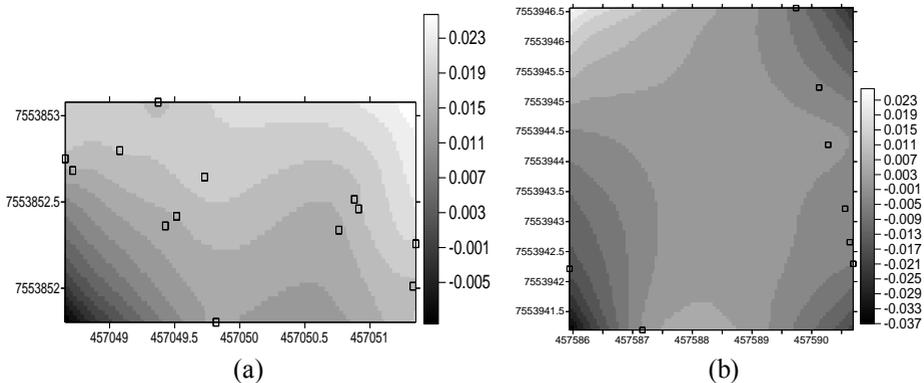
Os resultados estatísticos da avaliação estão apresentados na Tabela 3. O número de pontos de enlace foi definido pelo processo de geração automática, que depende das feições distinguíveis de cada área. As discrepâncias das estimativas altimétricas na região ortorretificada indicaram REMQ inferiores a 2 cm para as Áreas I e II. A maior média nas discrepâncias foi obtida na Área I, sendo igual a 6 mm, e os desvios-padrão de ambas as áreas resultaram em valores também abaixo de 2 cm.

Tabela 3 – Resultado das discrepâncias altimétricas calculadas pela diferença entre as coordenadas trianguladas e as interpoladas topograficamente.

Ortoimagem	Nº de pontos	REMQU (m)	Média (m)	Desvio-padrão (m)
Área I	14	0,015	0,006	0,014
Área II	8	0,019	0,002	0,019

Na Figura 7, são apresentados os mapas de discrepâncias entre os modelos de terreno levantados em campo e os modelos determinados a partir dos pontos de enlace, que também são mostrados nestes gráficos. Na comparação direta com as amostras, a Área I apresentou discrepâncias entre -1,2 e 3,4 cm, enquanto a Área II apresentou valores variando no intervalo de -3,7 a 2,7 cm.

Figura 7 – Mapa das discrepâncias em Z (em metros): (a) Área I e (b) Área II, mostrando pontos de enlace gerados automaticamente.



A partir dos MDT gerados, das imagens digitais e respectivos parâmetros (POE e POI), as ortomagens foram produzidas com as orientações próximas ao norte geográfico. É importante ressaltar que o pixel central da ortomagem tem coordenadas precisas, pois corresponde ao ponto de controle levantado com GNSS, mas os demais pixels podem apresentar uma pequena rotação, devido às incertezas nas medições do azimuth aproximado no levantamento de campo. Esta rotação não afetará o processo posterior de correspondência com imagens aéreas ou orbitais, porque os algoritmos de *matching* por mínimos quadrados (*Least Squares Matching* – LSM) absorverão esta pequena rotação, como mostrado por Berveglieri e Tommaselli (2013). Entretanto, esse problema pode ser facilmente resolvido pela introdução de uma segunda antena GNSS junto à câmara. O posicionamento relativo entre a antena GNSS da câmara e a antena GNSS sobre a placa de controle possibilita obter um azimuth acurado da imagem.

Em seguida, recortes ao redor do ponto de controle podem ser feitos para extrair *templates*. Experimentos com a correspondência multiescala entre imagens

terrestres e aéreas foram desenvolvidos por Berveglieri e Tommaselli (2013). Nesse tipo de aplicação, foi demonstrado que pontos de apoio podem ser automaticamente localizados com precisão subpixel por métodos de correspondência e alguns refinamentos. A técnica apresentada, neste artigo, conecta-se a esta previamente citada, pela fase anterior ao processo de localização de pontos, a qual consiste em localizar e medir automaticamente o ponto de apoio na imagem sem usar, portanto, técnicas interativas de medição. Dessa forma, erros manuais de medição são eliminados, e áreas distinguíveis podem ser usadas como elemento de controle terrestre para orientar imagens.

5. CONCLUSÕES

Uma técnica automática para a fototriangulação de imagens terrestres verticais e geração de ortoimagens de pontos de apoio foi apresentada e avaliada.

Considerando as dimensões das imagens que são adquiridas pela câmara *fisheye*, em alguns cenários de pontos de apoio, pequenas irregularidades da superfície podem não afetar significativamente as imagens pelo deslocamento radial devido ao relevo. Entretanto, quando há variações altimétricas significativas, a escala da imagem tem diferentes valores, conforme a distância radial em relação ao centro da imagem. Neste caso, a ortorretificação é necessária e foi avaliada em situações reais.

Experimentalmente, a técnica demonstrou em campo praticidade para a montagem e coleta de imagens e, ainda, tempo compatível com o levantamento GNSS. A aquisição de imagens com deslocamentos verticais evitou a necessidade de translação do sistema para aquisição de estéreo-pares, e verificou-se que nenhum operador especializado seria exigido para manipular o sistema, podendo ser o próprio topógrafo.

Uma placa de controle foi introduzida como parte do método. Embora a geometria provida pelos alvos não seja ótima, é aceitável para reconstruir a área do entorno do ponto de apoio. As análises estatísticas indicaram REMQ inferior a 2 cm nas discrepâncias altimétricas entre o MDT gerado e os dados de campo. O tamanho proporcionado também é suficiente para extrair recortes de imagens (ou *templates*) para servirem como cenas de controle.

Nesta técnica, apenas áreas com características distinguíveis precisam ser selecionadas. A placa de controle pode ser posicionada em qualquer local próximo às principais feições da área. Como resultado, um banco de ortoimagens de pontos de apoio com altíssima resolução (GSD \sim 3 mm) pode ser produzido.

Nos procedimentos apresentados, desenvolveu-se um fluxo automático, partindo da localização dos pontos de apoio até a ortorretificação de imagens, sem interações manuais para medir coordenadas, eliminando o erro proporcionado por um operador nessa tarefa. Em trabalhos futuros, todo esse fluxo automático será testado na orientação de blocos de imagens para avaliar sua acurácia global.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – processo 305111/2010-8) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – processo 2010/16954-5) pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERVEGLIERI, A.; TOMMASELLI, A. M. G. Multi-scale matching for the automatic location of control points in large scale aerial images using terrestrial scenes. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. v. XL-3/W1. p. 27–31, 2014.
- BERVEGLIERI, A.; TOMMASELLI, A. M. G. Automatic measurement of ground control points with terrestrial control chips for bundle block triangulation. In: Joint CIG Annual Conference and EOGC'2013. *Proceedings...*, Toronto, 2013.
- BROWN, D. C. Close-range calibration. *Photogrammetric Engineering*, v. 37, n. 8, p. 855–866, 1971.
- DREWNIOK, C.; ROHR, K. Automatic Exterior Orientation Of Aerial Images In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 31(B3), Viena, p.146–152, 1996.
- FRASER, C. S.; HANLEY, H. B.; YAMAKAWA, T. Sub-metre geopositioning with ikonos geo imagery. ISPRS Joint Workshop, 2001. *Proceedings...*, Hannover, 2001.
- GARRIDO-JURADO, S.; MUÑOZ-SALINAS, R.; MADRID-CUEVAS, F. J.; MARÍN-JIMÉNEZ, M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. v. 47, p. 2280–2292, 2014.
- GÜLCH, E. Automatic Control Point Measurement. In: *Photogrammetric Week'95*. Heidelberg, p. 185–196, 1995.
- HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Linear features in photogrammetry. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 9, n. 1, p. 3–24, 2003.
- HEIPKE, C. Automation of interior, relative, and absolute orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 52, n. 1, p. 1–19, 1997.
- JAW, J.-J.; WU, Y.-S. Control patches for automatic single photo orientation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 72, n. 2, p. 151–157, 2006.
- LÄBE, T.; ELLENBECK, K. H. 3D-wireframe models as ground control points for the automatic exterior orientation. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. v. 31(B2), Vienna, p.218–223, 1996.
- LI, N.; HUANG, X.; ZHANG, F.; WANG, L. Registration of aerial imagery and lidar data in desert areas using the centroids of bushes as control information. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 79, n. 8, p. 743–752, 2013.
- LOWE, D. G. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. In: *Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, v.2, p. 1150–1157, 1999
- LOWE, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *Int. J. Comput. Vision*, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004.

- LUGNANI, J. B. *Using digital entities as control*, 1980. PhD Thesis, Fredericton: University of New Brunswick, Canada.
- MALMSTRÖM, H. Measuring ground control points for satellite image rectification. *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Proceedings...* v. 11, p.127–135, 1986.
- MARCATO JUNIOR, J.; TOMMASELLI, A. M. G. Exterior orientation of CBERS-2B imagery using multi-feature control and orbital data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 79, p. 219–225, 2013.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, C. J. *Introduction to modern photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons, 2001, 479p.
- MULAWA, D. C.; MIKHAIL, E. M. Photogrammetric treatment of linear features. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. v. 27 (Part B3), p. 383–393, 1988.
- SCHENK, T. From point-based to feature-based aerial triangulation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 58, p. 315–329, 2004.
- SCHNEIDER, D.; SCHWALBE, E.; MAAS, H. G. Validation of geometric models for fisheye lenses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 64, n. 3, p. 259–266, 2009.
- SILVA, S. L. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; ARTERO, A. O. Utilização de alvos codificados na automação do processo de calibração de câmaras. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 20, n. 3, p. 636–656, 2014.
- RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; REIS, T. T. Evaluation of bundle block adjustment with additional parameters using images acquired by SA-API system. In: 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2009, Presidente Prudente. *Proceedings...*, Presidente Prudente, 2009.
- TOMMASELLI, A. M. G.; MARCATO JUNIOR, J.; MORAES, M. A. V.; SILVA, S. L. A.; ARTERO, A. O. Calibration of panoramic cameras with coded targets and a 3D calibration field. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. v. XL-3/W1. p. 137–142, 2014.
- TOMMASELLI, A. M. G.; MEDEIROS, N. G. Determination of the indirect orientation of orbital pushbroom images using control straight lines. *The Photogrammetric Record*, v. 25, n. 130, p. 159–179, 2010.
- TOMMASELLI, A. M. G.; BERVEGLIERI, A. Automatic orientation of multi-scale terrestrial images for 3D reconstruction. *Remote Sensing*, v. 6, n. 4, p. 3020–3040, 2014.
- TOMMASELLI, A. M. G.; LUGNANI, J. An alternative mathematical model to collinearity equations using straight features. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1988, Part B3, p.765–774, 1988.
- TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L. A recursive approach to space resection using straight lines. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 62, n.1, p. 57–66, 1996.

TOURNAIRE, O.; SOHEILLIAN, B.; PAPANODITIS, N. Towards a sub-decimeter georeferencing of ground-based mobile mapping systems in urban areas: matching ground-based and aerial-based imagery using roadmarks. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. *Proceedings...*, Paris, 2006.

(Recebido em março de 2014. Aceito em dezembro de 2014).

A MODEL SUGGESTION FOR THE DETERMINATION OF THE TRAFFIC ACCIDENT HOTSPOTS ON THE TURKISH HIGHWAY ROAD NETWORK: A PILOT STUDY

*Sugestão de modelo para a determinação de pontos críticos de acidentes de tráfego
na rede de estradas de rodagem da Turquia: um estudo piloto*

SAFFET ERDOGAN^{1,*}
VELI ILÇI²
OMER M. SOYSAL³
AYSEGUL KORKMAZ⁴

^{1*}Department of Geomatics, Faculty of Engineering, Afyon Kocatepe University,
TR-03200, Afyonkarahisar, Turkey

²Department of Geomatics, Faculty of Engineering, Çorum Hitit University, TR-
19200, Çorum, Turkey

³Department of Information Systems and Decision Sciences, Louisiana State
University, Baton Rouge 70803, USA

⁴General Directorate of Highways, TR-06100, Ankara, Turkey
Saffet_erdogan@hotmail.com; veliilci@gmail.com; omsoyal@lsu.edu;
aysegulkorkmaz86@gmail.com

ABSTRACT

Traffic accidents are very serious problems for human life and the environment. In road safety, it is crucial to identify the high risk locations to apply proper counter measures. This paper aims at introducing outcomes of a pilot project whose main goal is to develop a GIS based crash analysis system integrated with the quantitative methods for identification of high risk locations on road networks in Turkey. In this concept, traditional hotspot detection methods used in Turkey (crash frequency, rate, and severity) are compared with the spatial statistical methods including Moran's I, GetisOrd G and planar and network kernel density estimation in terms of their sensitivity to spatial characteristics of crash clusters.

Many countries use traditional hotspot detection approaches such as crash frequency, crash rate, and crash severity as well as Turkey. In this project, we aimed

at obtaining a model including different hotspot identification methods for the safety program of Turkey. In order to obtain the model, many hotspot detection methods will be used and compare stage by stage. In the first stage, the seven methods mentioned above are used and examined. Although some of these methods are compared in couple, there is no study using all these methods together extensively in the literature. Methods validated with a different spatial vantage points. Repetitiveness of hotspots in a seven years period are used to compare the methods. Meanwhile advantages and disadvantages of the methods according to location of hotspots are examined additionally. Results show that using planar KDE with Gi in the junction locations and using planar KDE with Moran's I in the straight road locations could improve the model while determining hotspots

Keywords: Traffic Accidents; Hotspot; Spatial Statistical Methods; GIS.

RESUMO

Acidentes de trânsito são sérios problemas para os seres humanos e para o meio ambiente. Para a segurança nas estradas, é crucial que se verifique os locais de alto risco para aplicar contra-medidas apropriadas. Este trabalho objetiva introduzir resultados de um projeto piloto cujo objetivo principal é o desenvolver um sistema de análise de acidentes baseado em SIG integrado com métodos quantitativos para identificar os locais de alto risco em rede de estradas de rodagem na Turquia. Neste conceito, métodos tradicionais de detecção dos pontos críticos usados na Turquia (frequência de acidentes, velocidade e severidade) são comparados com métodos estatísticos espaciais incluindo Moran's I, GetisOrd G, Planar e densidade do núcleo da rede estimados nos termos de sua sensibilidade para as características espaciais de uma série de acidentes. Muitos países usam métodos de detecção de pontos críticos tradicionais tais como frequência, velocidade e sensibilidade assim como na Turquia. Neste projeto, nós tentamos obter um modelo incluindo diferentes métodos de identificação de pontos críticos para um programa de segurança na Turquia. A fim de obter o modelo, muitos modelos de detecção de pontos críticos serão usados e comparados por estágio. No primeiro, os sete métodos mencionados acima serão usados e examinados. Apesar de alguns destes métodos serem comparados em duplas, não há nenhum estudo na literatura usando todos juntos extensivamente. Métodos validaram pontos de natureza espacial diferente. A repetição de pontos críticos num período de sete anos, são usados para comparar os métodos. Enquanto isto, vantagens e desvantagens de métodos de acordo com a localização de pontos críticos são examinadas adicionalmente. Os resultados mostraram que usando o Planar KDE com Gi nos locais de encruzilhadas e usando o Planar KDE com Moran's I em locais de estrada retas poderiam melhorar o modelo enquanto se determina os pontos críticos.

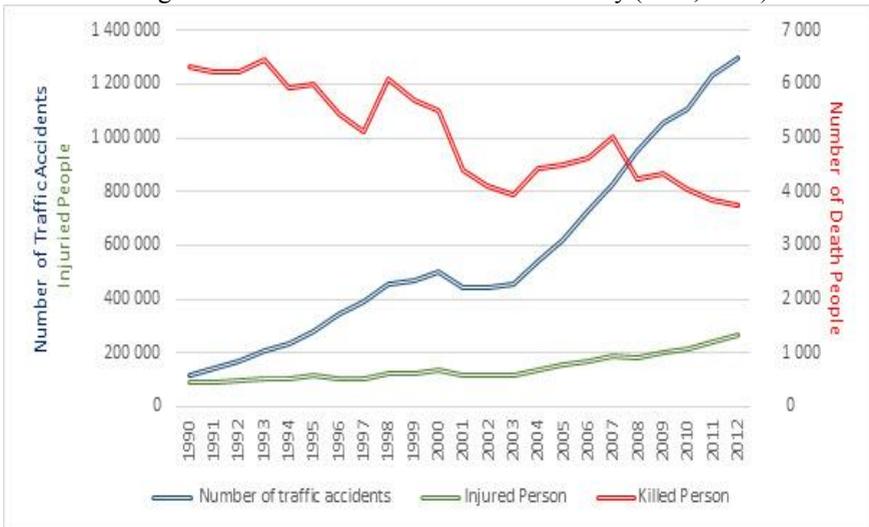
1. INTRODUCTION

Traffic accidents are one of the most harmful events that humans have to face on a daily basis. According to the World Health Organization, approximately 1.4

million people die and 45 million people are injured in road traffic accidents around the world each year. Likewise, the number of fatalities in traffic accidents has increased from 1 billion in 2001 to 1.4 billion in 2011, with a ranking increase from position 11 to 9 as the leading cause of death. It is expected that 17 million people will lose their lives and more than 200 million people will be severely and permanently injured by 2020, on roads all over the world (WHO, 2013).

Turkey, a rapidly developing country, is a junction point between Asia and Europe in terms of its social and economic structure. Following the world trends, approximately 42000 people lose their lives due to traffic accidents, while approximately 3.5 million people are injured each year (ETSC, 2013). According to statistics from the General Directorate of Police, the number of accidents in Turkey has increased from 440000 in 2002 to 1296636 in 2012. On average, 4000 people die and 170000 are injured each year (TNP, 2013). Despite great improvements in the road infrastructure during this period, the increase in the number of motor vehicles paralleled to the economic growth has caused the number of road traffic accidents to rise enormously. Although there has been an increase in the number of traffic accidents, deaths caused by traffic accidents have reduced. According to the Who, Turkey is ranked at 146 out of 192 countries, in terms of the estimated road traffic death rate per 100000 of population. The number of traffic accidents, deaths, and injuries from 1990 to 2012 is shown in Figure 1. On the other hand, the economic impact of traffic accidents is equivalent to 2 percent of gross national product in terms of economic loss. The cost of traffic accidents is expected to be 22 billion Turkish lira.

Figure 1 - Traffic accident statistics in Turkey (TNP, 2013).



Any effort to reduce the impact of traffic accidents is crucial. Among these, locating the high risk locations, so called hotspots, and identifying possible causes have been studied extensively. Hotspot identification is usually the first step in a safety improvement program. In many safety improvement programs sites are ordered according to ranking criteria and a subset of sites are then selected as the highest accident risk sites. Since budgets are limited, the priority is given to these locations for the implementation of precautionary measures.

The current practice of the Turkish Highway Agency is to apply a rate quality-control method, which combines the crash rate, frequency, and severity as ranking criteria. Raw risk estimators have several limitations, such as incorrect classification due to the random variation of traffic accidents year by year, as discussed in a number of studies (HAUER, 1997; MIAU and SONG, 2005). Therefore, we aimed to develop a model including both traditional and model based spatial statistical methods to determine the hotspots on a geographical information system (GIS) platform. The project has three main stages: in the first stage, the study area will be examined for hotspots based on the crash rate, the crash frequency, and the crash severity ranking, Kernel density analysis, and local spatial autocorrelation methods (Moran's I, GetisOrd G). In the second stage, Poisson regression, Negative binomial regression and Empirical Bayesian methods will be implemented. In the last stage, methods will be weighted according to the results. In this paper, we present our findings for the only first stage.

2. LITERATURE REVIEW

As mentioned above, traffic safety is the most critical matter in the transportation strategy of many agencies. Increasing traffic safety on the highway network is the aim of many countries' comprehensive safety programs. Today, highway agencies use different hotspot techniques. In his study, Elvik (2008) considered hotspot definitions and hotspot detection approaches in eight European countries. He proposed four criteria for an adequate definition of a hotspot location. According to Elvik, a good system 1) should control for random fluctuations in the number of accidents, 2) should account for as many of the factors that are known to influence road safety as possible, 3) should identify sites at which fatal and serious injury accidents are over represented, and 4) should identify sites at which local risk factors related to road design and traffic control make a substantial contribution to accidents. In addition, he suggests that the identification of hotspots should rely on the EB method because of these criteria.

Meuleners et al. (2008a) examined the effectiveness of the black spot programs in Western Australia. They only examined the structural action of the system and did not check any hotspot detection methods for the country. They identified some deficiency in accident reporting knowledge, traffic volume knowledge and monitoring of the black spot areas in the country.

Meulenerset al. (2008b) studied the international black spot programs in 12 different countries including the USA, Belgium, the UK, the Netherlands, Denmark, Portugal, Canada, New Zealand, Germany, Sweden, Austria and Norway. According to Meulenerset al. the majority of the countries uses a non-model based (crash number and crash frequency) black spot identification. Meanwhile, a few countries, such as Canada, Texas, Austria and the UK use the 'crash rate' method (crashes per vehicle km). Only three countries identified the use of model-based methods of identification, including category analysis in Kentucky, USA, the Poisson statistical method in Denmark and the Empirical Bayes approach in Portugal. All three of these countries use these methods in combination with the non-model based 'crash number' method.

Similarly, Sorensen and Elvik (2007) examined the same European countries and reported their studies under the title of "Best Practice Guidelines on Black Spot Management and Safety Analysis of Road Networks" in the six European Framework Programs. They rated Model-based methods as best practice for black spot identification, because of the usage of statistical techniques that take into account systematic variation determined by general road design and traffic volume, as well as random variation. The Empirical Bayes technique, traditional approaches including the Poisson or Negative Binomial Distribution and Category analysis are rated as Model-based methods, considered the best from a theoretical point of view. They declared the weakness of these model-based methods, as they require comprehensive and connected crash, road and traffic data. When such data is not available they suggested using non-model based methods of identification. The best non-model based black spot identification methods are ranked as crash frequency-rate, crash rate, crash frequency and crash number, respectively in this report.

Many of the studies focusing on a country's safety program are not concerned with hotspot detection methods, but are interested in structural action with regard to the traffic safety program. With the exception of safety programs, there is fairly extensive literature focused on hotspot identification methods.

Past research has focused on developing appropriate measures that can be used to quantify the safety status or risk at individual sites. The simplest risk measures of crash frequency and crash rate methods are studied by many (PERSAUD, 2001; TARKO and KANODIA, 2004; CHENG and WASHINGTON, 2005; ELVIK, 2007; MONTELLA, 2010). Raw risk estimators have several limitations, such as incorrect classification due to the random variation of traffic accidents year by year, as discussed in a number of studies (HAUER, 1997; MIAU and SONG, 2005). As an alternative, model-based approaches, such as Poisson and negative binomial regression models (HAUER, 2001; ERDOGAN *et al.*, 2008; LORD and MANNERING, 2010) have been used widely for predicting the occurrence of accidents on highways. Due to the regression to mean problem in Poisson regression and Negative Binomial regression models, model-based approaches that apply random effect or Bayesian models have become more popular in the safety literature (HAUER, 1992; HAUER, 2001; MIRANDA-MORENO *et al.*, 2007; ELVIK, 2007;

MONTELLA, 2010). Local spatial autocorrelation methods and density analysis have frequently been used in recent years because of the ease of these methods and powerful visualization (FLAHAUT et al., 2003; ERDOĞAN et al., 2008; ERDOĞAN, 2009). As a result, a number of comparison studies have also been devoted to the issue of the relative performance of EB technique in the other hot spot detection techniques (PERSAUD and HAUER, 1984; ELVIK, 2007). Some studies have also proposed to incorporate accident severity into the risk measures (HAUER et al., 2004; MIRANDA-MORENO, 2006)

Researches on hotspot selection rules are still noticeably scarce. In this research we attempt to develop a model including several hotspot detection methods to determine the hotspots in the highways of Turkey. In this concept, seven different hotspot detection methods are examined to develop the model in the first stage in a pilot study.

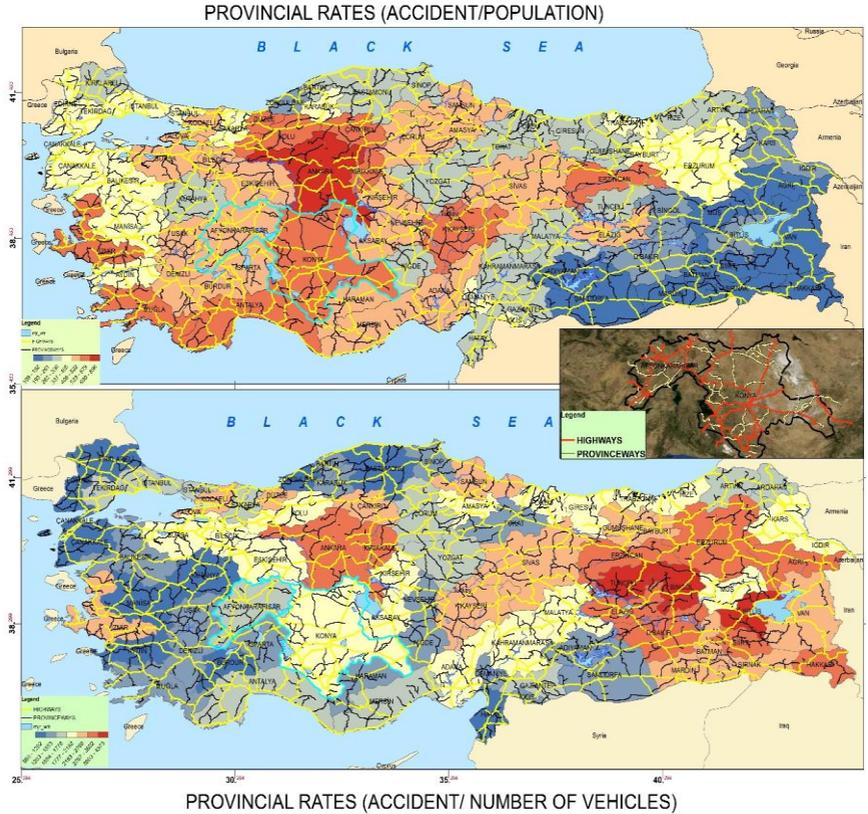
3. DATA, METHODS AND METHODOLOGY

3.1 Data

Accident and location information is recorded by the Traffic department of the General Directorate of National Police and General Directorate of Highways in Turkey. We collected fatal or injury traffic accident data on some roads of Turkey in the period of 2005-2012. This data set consists of a total of 254,672 records with 33 columns for 8 years. Columns consist of 33 different items, including the accident location, date of accident, accident id, accident year, month of accident, accident day, day of the week, time, place of accident, non-residential/residential condition, road division, road id, becoming type, km, meters, the number of vehicles, weather, day forecast lighting, working on the road, the road direction, stimulating traffic sign, road surface, death total, injured total, road geometry horizontal, vertical road geometry, road geometry other, X coordinate, and Y coordinate. The Turkish digital road network, which was updated in 2011, and the Annual Average Daily Traffic data were provided by the General Directorate of Highways. The locations of the accidents are recorded with both the GPS location and the distance in mile from a reference point. The data collected has some errors, such as typos or inaccurate GPS coordinates due to lack of waiting time for the satellite signal, or errors due to recoding previous coordinates when the device is turned on each time. The distance is used to correct location information for these types of records in error.

As a pilot study, the accident records collected from the Afyonkarahisar and Konya provinces were used to compare the hotspot detection methods. In this study, 1138 accidents in 2005, 1231 accidents in 2006, 1328 accidents in 2007, 1212 accidents in 2008, 1322 accidents in 2009, 1372 accidents in 2010, 1614 accidents in 2011, and in total 9,217 accident records were used. The location and the road network of Turkey are shown in Figure 2, according to the provincial accident rates.

Figure 2 - Highway network and provincial accident rates of Turkey.



3.2 Methods

Crash Frequency: crash frequency is one of the simplest forms of crash data analysis. It is defined as the number of crashes occurring within a specific period on a highway segment. Highway network divided to 1° (nearly 1 km) segments. Applying this method, segments are ranked in descending order. In order to compare segments of different lengths, the total number of crashes is divided by the segment length within the same time period. These results are compared with a critical value (F_c) (SWEROAD, 2001) that is calculated with the formulae of

$$F_c = F_a + K_{\alpha} \sqrt{F_a} / L - 0.5 / L \quad (1)$$

Where, F_a average F value and K_{α} is the significance level.

Crash rate: The crash rate CR method normalizes the frequency of crashes with exposure data. Crash rate analysis typically uses exposure data in the form of traffic volumes. Traffic volumes are expressed in the form of Annual Average Daily Traffic. The crash rate analysis provides a more effective comparison for similar locations.

In order to compare the segments of different lengths, the total number of crashes is multiplied with 1000000 then divided by the segment length and Annual Average Daily Traffic data in the same time period. These results are compared with a critical value (CR_c) (SWEROAD, 2001); the formulae for CR and CR_c are given by

$$CR_c = \lambda + k_\alpha \sqrt{\lambda/m} - 0.5/m \text{ and } CR = \frac{TA * 1000000}{AADT * 365 * L} \quad (2)$$

where λ is the average crash rate for the similar segments, m is AADT for that segment and k_α is the significance level

Crash severity: The amount of severity measured for a section can assist officials in determining its safety improvements. In addition, if two similar sections have the same number of accidents, it may be appropriate to select the section with more severe crashes.

In order to compare the segments of different sections, as defined in (SWEROAD, 2001), the accident severity of a section is calculated by

$$\text{Severity (S)} = \text{Number of Fatalities} \times 9 + \text{Number of Injured Persons} \times 3 + \text{Number of Damaged Vehicles} \times 1. \quad (3)$$

This value can be divided by a suitable value. One such a value could be the number of accidents A_i . The relative severity value Q_i for a segment i is then

$$Q_i = \frac{S_i}{A_i} \quad (4)$$

The average severity value is estimated with

$$Q_{average} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5)$$

The result values compare with a critical value (Q_c) that is calculated with the formulae

$$Q_c = Q_{average} + k_\alpha \sqrt{\sigma^2} \quad (6)$$

The road section is considered to be a black spot, from the severity point of view, if $Q_1 > Q_c$.

Kernel Density Estimation (KDE): KDE is one of the most popular methods for analyzing the first order properties of a point event distribution and it has been widely used to determine the traffic accident hotspots. Kernel density estimation involves placing a symmetrical surface over each point and then evaluating the distance from the point to a reference bandwidth, based on a kernel function and calculating a magnitude per unit area, then summing the value for all the surfaces for that reference location. Conceptually, a smooth curved surface is fitted over each point. The surface value is highest at the location of the point, and diminishes away from the point, reaches zero at the radius distance from the point (SILVERMAN, 1986).

KDE are usually defined as planar methods; whereas traffic accidents are bound to the network. As some researches (OKABE et al., 2009; XIE and YAN, 2013; LOO and YAO, 2013) pointed out, the planar KDE over a 2-D Euclidean space has its limitations in analyzing traffic accidents.

Moran's I and GetisOrd G are the most commonly used global statistics for measuring spatial autocorrelation by translating a non-spatial correlation to a spatial context (GETIS and ORD, 1992). Local spatial statistics are better suited for practical applications like hot-spot detection. Local spatial autocorrelation methods can help to identify and examine where unusual clusters of events occur, based on a formal assessment of statistical significance (XIE and YOUNG, 2013).

Local Moran's I: is fully developed by Anselin (1995) as LISA and its formulation is shown in the following equation.

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left(\sum_{i \neq j}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \right) \left(\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right)} \quad (7)$$

In addition, G_i^* statistics are used to detect local pockets of dependence that may not show up when using global spatial statistics (ORD and GETIS, 1995).

The G_i^ statistic*: is often used to identify whether high values (hot spots) or low values (cold spots) exist, based on the distance. A high value G_i^* statistic indicates a spatial cluster of high values, while a low value G_i^* statistic indicates a spatial cluster of low values around the given area. The formulation is shown in the following equation.

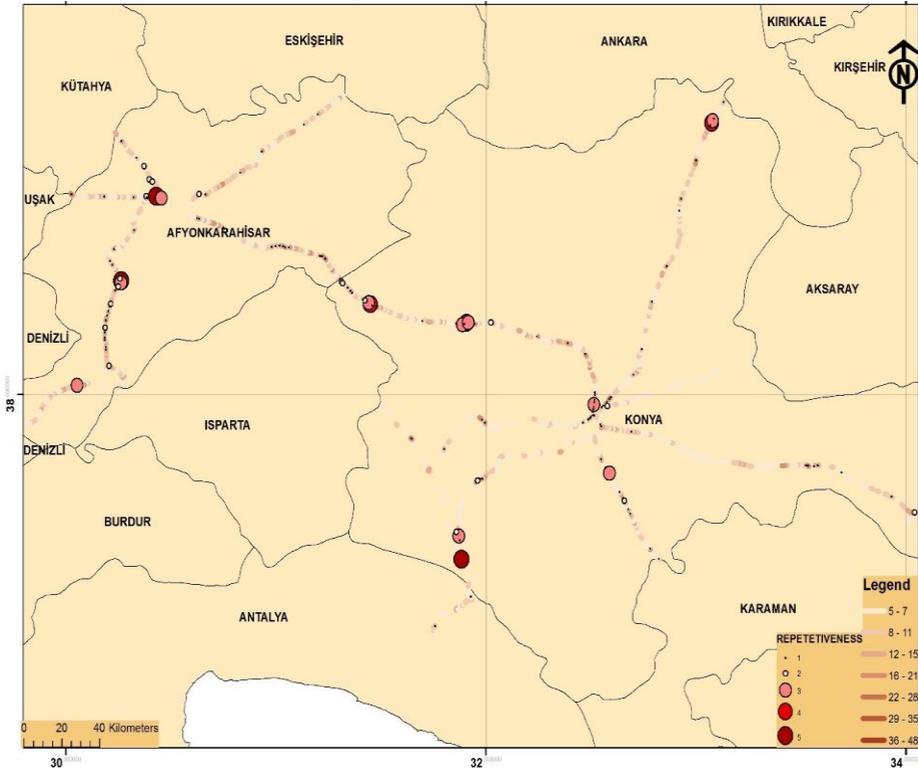
$$G(d) = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i X_j)}{\sum_i \sum_j (X_i X_j)} \quad (8)$$

For both Moran's I and G_i^* statistics, the statistical significance, as a measure of confidence that accident patterns are not simply due to chance, can be calculated through a number of formulae that have been derived by either the normal approximation or by randomization experiments. The null hypothesis used to examine the significance of methods is that the location of a variable attached to certain areas has no importance, and only the frequency of the variable values has statistical significance (ANSELIN, 1995; GETIS and ORD, 1992).

3.3 Methodology

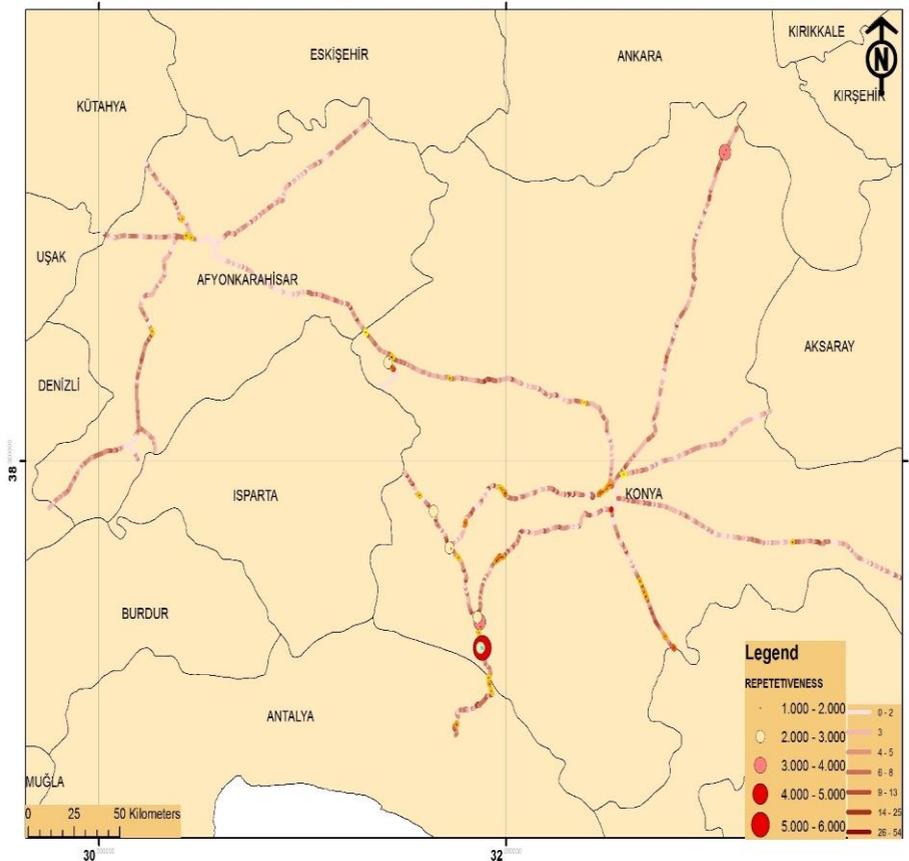
When the methodology of hotspot detection methods are examined: In the study, the critical crash number is used as 5 for all years in the crash frequency method. Repetitiveness of the locations within the study period to detect hotspots is shown in Figure 3.

Figure 3 - Hotspots detected with crash frequency method and repetitiveness of detected hotspots in the period of 2005-2012.



Secondly, the critical crash rate is used as 4 for all years in the crash rate method. Repetitiveness of the locations is shown in Figure 4, where we define the repetitiveness of a location as the number of years observing a crash at the location.

Figure 4 - Hotspots detected with crash rate method and repetitiveness of detected hotspots in the period of 2005-2012.

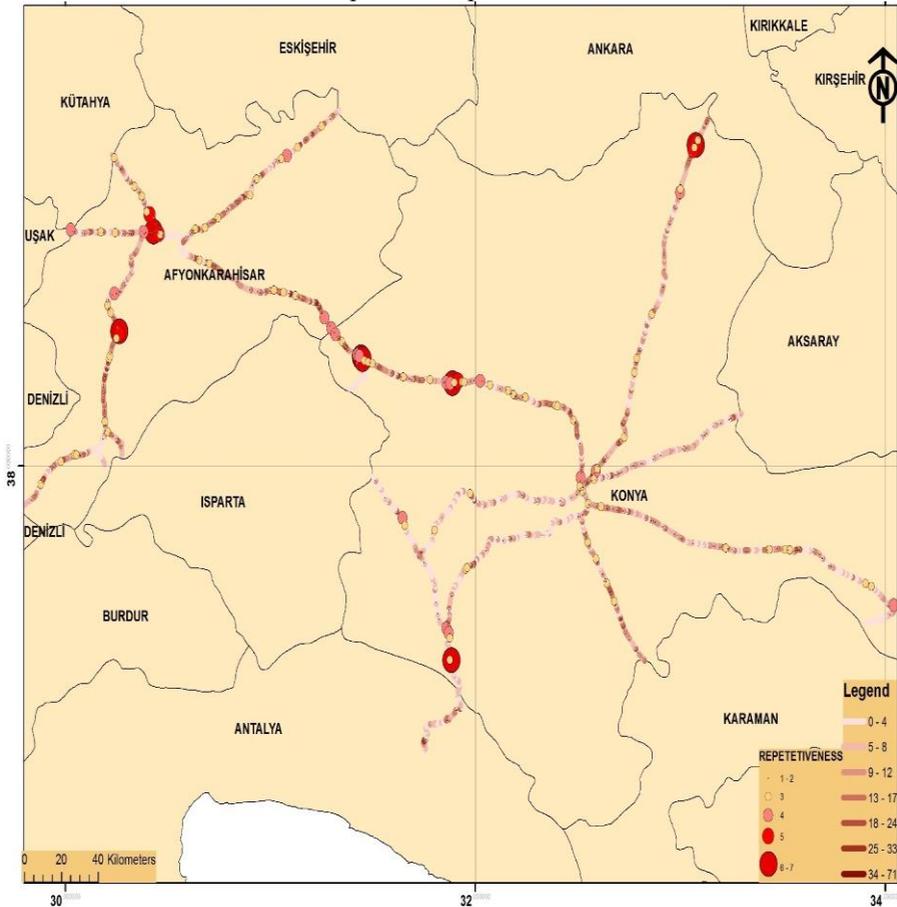


Thirdly, the critical crash severity is used as 10 for all years in the study. Repetitiveness of the locations during the period of study to detect the hotspot is shown in Figure 5.

Because of the limitations told in the previous section are usually concerned with urban roads and not with highways, in order to compare the planar and network kernel density results, a free ArcGIS-based software tool is used. This is software

Spatial Analysis on a Network (SANET), developed by a group of researchers at the University of Tokyo (OKABE et al., 2009).

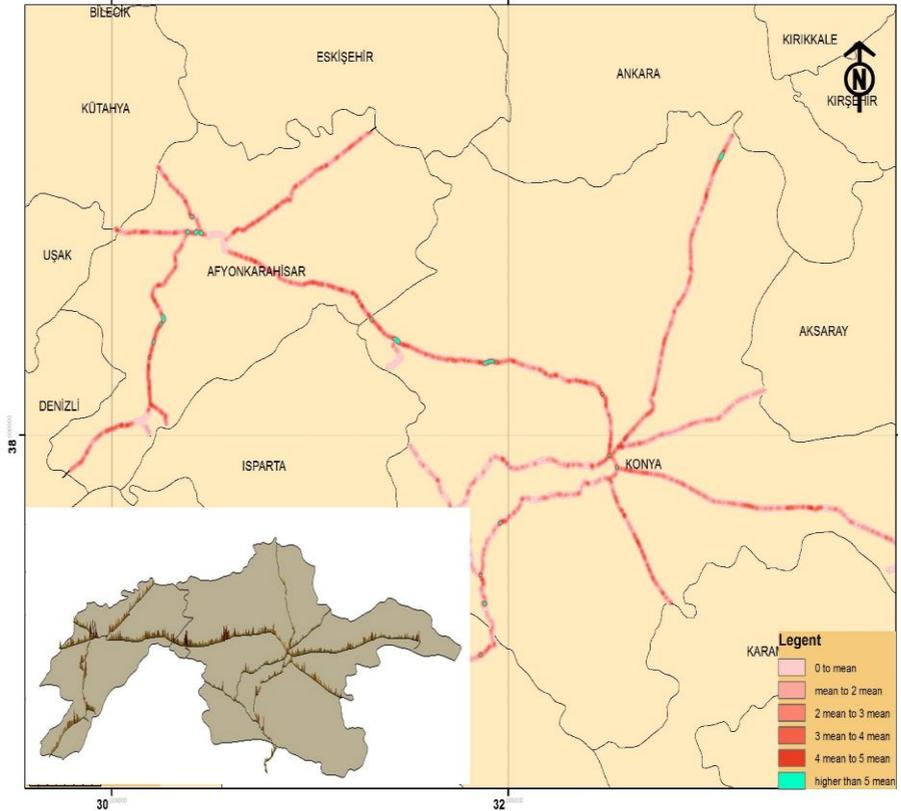
Figure 5 - Hotspots detected with crash severity method and repetitiveness of detected hotspots in the period of 2005-2012.



In the study, accidental magnitude values were calculated per 50m \times 50m areas with a 700 m bandwidth for every year based on quadratic kernel function with Arc GIS and SANET module. Average values for the 2005-2012 period were calculated with the raster calculator tool in the Arc GIS Spatial Analyst extension. To show the hotspots we used incremental multiples of the grid cells' mean by standardizing the thematic threshold settings of kernel density estimation (CHAINEDY et al., 2002; ECK et al., 2005) Figure 6 shows the results of this hotspot threshold approach,

based on both planar and network kernel density estimation surfaces for the pilot area.

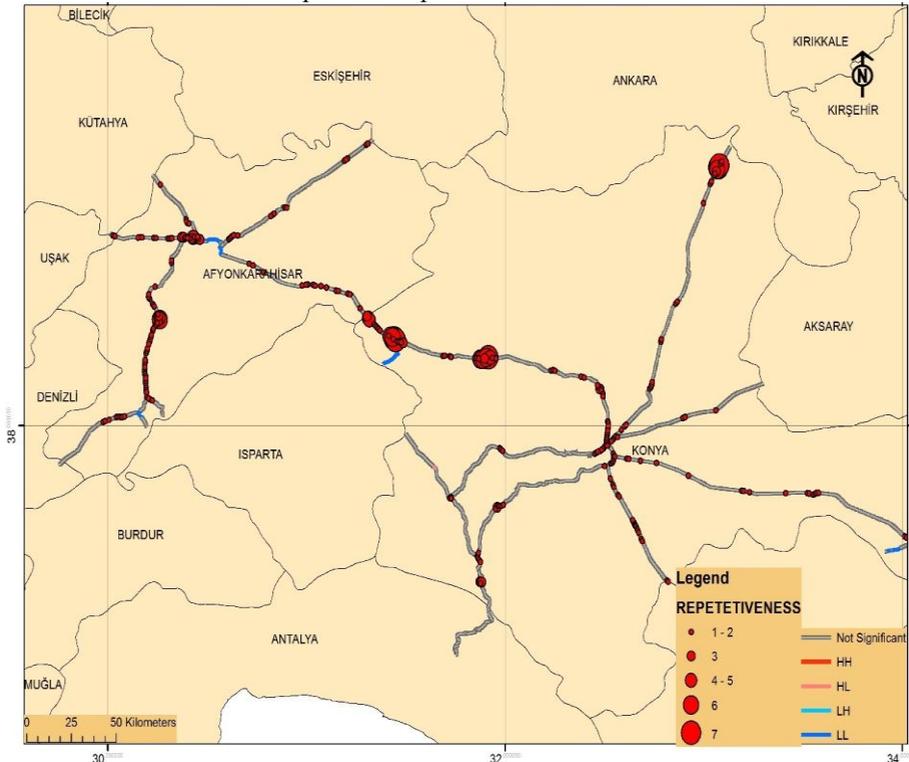
Figure 6 - Hotspots detected with Planar and Network KDE method in the period of 2005-2012.



Although KDE is a method examining the first-order effects of a spatial process, one of the major limitations of KDE and Net KDE is that no formal statistical inference is employed in the process. In addition, although we used the threshold mentioned above, there is not a clear indication of a density threshold by which a hot spot can be confidently declared yet. Therefore, spatial autocorrelation methods are used for examining the second-order effects of a spatial process. Spatial autocorrelation methods may be used to assess the extent to which the value of a variable at a given location influences values of that variable at contiguous locations.

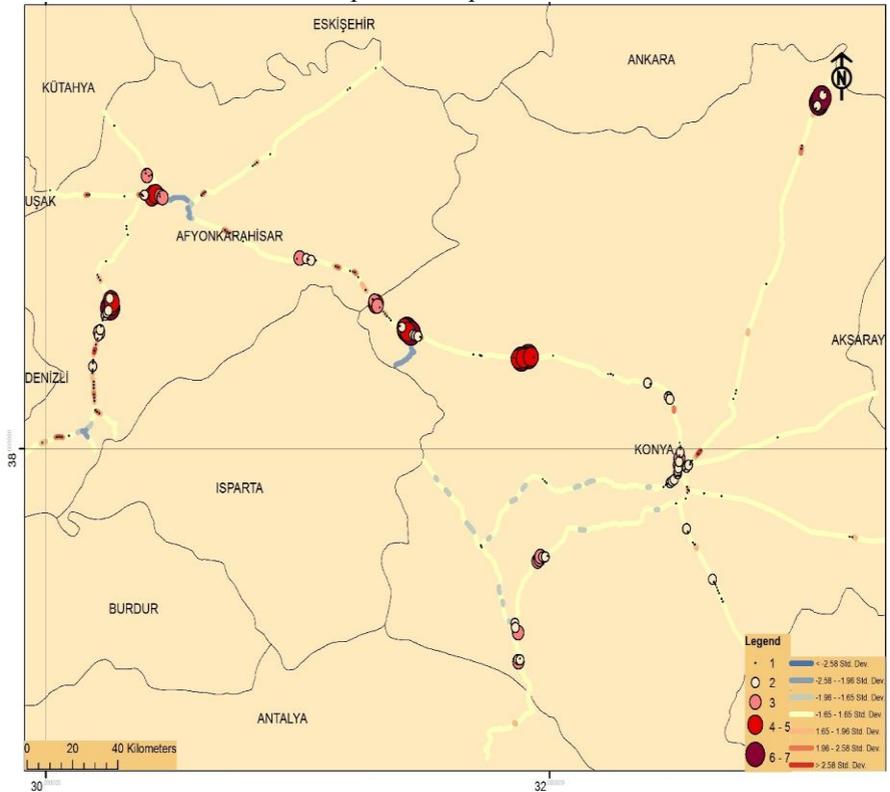
LISA (Local Indicator of Spatial Association) was used as a local indicator of spatial association, which highlights those clusters of accident locations with similar values. Local analyses based on the LISA statistics are visualized in the form of significance and cluster maps. Four other situations are identifiable from the LISA data: first, a cluster of locations with high-high numbers with excessive accident numbers; second, a cluster of locations with high-low numbers; third, a cluster of locations with low-high numbers; and fourth, a cluster of locations with low-low numbers; Figure 7.

Figure 7 - Hotspots detected with Moran’s I method and repetitiveness of detected hotspots in the period of 2005-2012.



The second spatial autocorrelation method G_i^* statistics are used to detect local pockets of dependence. A high value G_i^* statistic indicates a spatial cluster of high values, while a low value G_i^* statistic indicates a spatial cluster of low values around the given area (Figure 8).

Figure 8 - Hotspots detected with Getis-Ord G method and repetitiveness of detected hotspots in the period of 2005-2012.

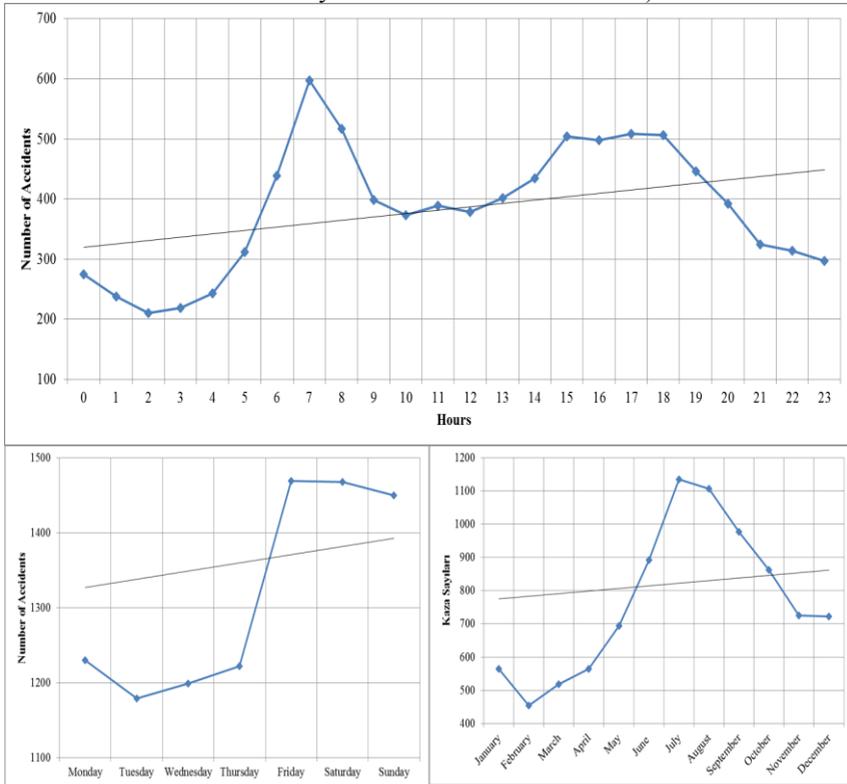


4. RESULTS

Hotspots can have two different dimensions as temporal and spatial dimensions. In this paper, the spatial dimension of hotspots is examined by using different hotspot detection methods and a detail analysis of the temporal dimension is left as a future study. At this time, only the temporal distribution of the accidents is summarized in Figure 9.

In Figure 9, we examined traffic accidents occurring on Friday, Saturday, and Sunday and in the months of July and August. These results verify the previous studies of Erdogan et al. In general, the increasing number of accidents in the summer months is related to expatriates coming from abroad and the increase in the number of accidents on the weekend days is related to weekend trips. An intensity of traffic accidents arises at the beginning and end of work hours.

Figure 9 - The number of accidents according to the occurrence time (Hourly, daily and monthly distributions of the accidents).



When the results of hotspot detection methods are examined in terms of spatial dimension and detection performance the crash severity method is very sensitive to the accidents that occurred with multiple vehicles. In particular, the number of fatalities affects the results enormously. Therefore, random accidents, such as those due to carelessness, affect the hotspot detection. As shown in Table 1, the crash severity method determined the most number of segments (656) as a hot spot. When the repetitiveness of the crash severity method was examined, more than half of the segments (392) determined as a hotspot in a single year only. Only one segment was determined as a hotspot in all years. The crash rate and crash frequency methods determined the least number of hotspots. The crash frequency method does not consider the AADT and a high number of traffic accidents in the high traffic density can give deceptive results. Meanwhile, low AADT values in the highways can cause similar deceptive results in the probable high number of accidents.

The Gi statistic is very sensitive to the point cluster patterns and this situation sometimes conflicts with the traffic hotspot concept. Gi statistics determine a segment as a hotspot when it is clustered with segments having a high number of accidents. In such a case, Gi statistics show large areas covered in clusters and cannot provide a clear hotspot boundary. This situation usually occurs in the junction locations and give rise to misunderstanding in terms of traffic safety. On the contrary, Moran's I is more powerful for such cases occurring in junction areas. However, although Moran's I is more sensitive to unusual jumps in the number of accidents, it is very deceptive in the areal clusters. The first situation of Moran's I is very important for determining the hotspots arising from the road geometry in terms of traffic safety. Both Gi and Moran's I statistics can give different results, depending on the spatial weight matrix and the scale of the study area. When only the fixed distance band method is used in the generation of spatial weight matrices, the significance of Gi values can be deceptive for areas with a sparse location. A combination of k nearest neighbor and fixed distance band methods must be used together in the generation of weight matrices. Kernel density analysis is very sensitive for visual detection and has a tendency towards the particular type of locations. It is not very sensitive to the areal cluster pattern and there is not a statistical significance for the reliability. Another challenge for identifying hotspots related to traffic accidents is the network restriction. In this study, both network and planar kernel density analysis was used. Planar KDE has a density at any location within the study area, while the network KDE has a density only its network (Kuo *et al.*, 2011). The network and the planar KDE gave almost the same results. In cases where the conjunction areas are arising, the planar KDE is affected from the neighbor routes while the network KDE is poor in visualization of areal clusters and in the interaction of regional distribution.

Table 1 - Repetitiveness of hotspots detected with the used methods.

Repetiteveness of hotspots	Moran's i	Getis Ord gi	Crash rate	Crash severity	Crash frequency
Number of Hotspots	268	232	57	656	145
1 Repetitiveness	185	158	39	392	110
2 Repetitiveness	51	37	10	154	19
3 Repetitiveness	15	15	5	77	10
4 Repetitiveness	5	9	2	19	3
5 Repetitiveness	7	4		7	3
6 Repetitiveness	3	6	1	6	
7 Repetitiveness	2	3		1	
TOTAL Number Of Accidents	419	390	88	1085	205

5. CONCLUSION

In conclusion, many studies in the literature have shown that using different hotspot detection methods leads to different results. Very few studies have attempted to combine the different hotspot detection methods in a study area. Results showed that using planar KDE with Gi in the junction locations and using planar KDE with Moran's I in the straight road locations could identify hotspots more accurately. This study is the first part of a project that attempts to develop a hotspot detection model for Turkey. In the first stage we employed seven different hotspot detection methods and studied advantages and disadvantages of the methods in the pilot area. Future work will contain the results of negative binomial, Poisson regression and empirical Bayesian methods, in terms of the usage of these methods in traffic safety and a suggestion for incorporation of these methods as a model.

ACKNOWLEDGEMENTS:

This work was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey Program 1001 (113Y417)

REFERENCES

- ANSELIN, L., 1995. Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis* 27 (2), 93-116.
- CHANEY, S., REID, S., STUART, N., 2002. *When is a hotspot a hotspot? A procedure for creating statistically robust hotspot maps of crime*. Taylor and Francis, London, England, pp.21-36.
- CHENG, W., WASHINGTON, S., 2005. Experimental evaluation of hotspot identification methods. *Accident Analysis and Prevention* 37, 870-881.
- ECK, J., CHANEY, S., CAMERON, J., WILSON, R., 2005. Mapping crime: Understanding hotspots (Special Report). *National Institute of Justice*, Washington, D.C.
- ELVIK, R., 2007. State-of-the-art approaches to road accident black spot management and safety analysis of road networks. *Institute of Transport Economics*, Oslo, Norway.
- ELVIK, R., 2008. A survey of operational definitions of hazardous road locations in some European countries. *Accident Analysis and Prevention* 40(6), 1830-1835.
- ERDOGAN, S., YILMAZ, I., BAYBURA, T., GULLU, M., 2008. Geographical information systems aided traffic accident analysis system case study: city of Afyonkarahisar. *Accident Analysis and Prevention* 40 (1), 174-181.
- ERDOGAN, S., 2009. Explorative spatial analysis of traffic accident statistics and road mortality among the provinces of Turkey. *Journal of Safety Research* 40(5), 341-355.
- ETCS (*European Transport Safety Council*), 2013. <http://www.etsc.eu/home.php>
- FLAHAUT, B., MOUCHART, M., MARTIN, E.S., THOMAS, I., 2003. The local spatial autocorrelation and the kernel method for identifying black zones a comparative approach. *Accident Analysis and Prevention* 35, 991-1004.

- GETIS, A., ORD, J. K., 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24(3), 189-206.
- HAUER, E., 1992. Empirical Bayes approach to the estimation of unsafety: the multivariate regression approach. *Accident Analysis and Prevention* 24, 456-478.
- HAUER, E., 1997. *Observational before-after studies in road safety*. Pergamon, Tarrytown, NY.
- HAUER, E., 2001. Over dispersion in modeling accidents on road sections and in empirical bayes estimation. *Accident Analysis and Prevention* 33(6), 799-808.
- HAUER, E., Council, F. M., and MOHAMMEDSHAH, Y., "Safety Models for Urban Four-Lane Undivided Road Segments." *Transportation research record*. No. 1897 (2004), p. 96-105
- KUO, P., ZENG, X., LORD, D., 2011. Guidelines for choosing hot-spot analysis tools based on data characteristics, network restrictions, and time distributions. In *Proceedings of the 91 Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January, pp.22-26.
- LOO, B. P., YAO, S., 2013. The identification of traffic crash hot zones under the link-attribute and event-based approaches in a network-constrained environment. *Computers, Environment and Urban Systems* 41, 249-261.
- LORD, D., MANNERING, F.L., 2010. The statistical analysis of crash-frequency data: a review and assessment of methodological alternatives. *Transportation Research Part A* 44(5), 291-305.
- MEULENERS, L., FRASER, M., 2008. Review of the Wa state black spot program: a literature review of Australian and international black spot programs. *Centre For Population Health Research, School of Public Health, Curtin University of Technology, Perth*.
- MEULENERS, L.B., HENDRIE, D., LEE, A.H., LEGGE, M., 2008. Effectiveness of the black spot programs in Western Australia. *Accident Analysis and Prevention* 40, 1211-1216.
- MIAOU, S. P., SONG, J. J., 2005. Bayesian ranking of sites for engineering safety improvement: decision parameter, treatability concept, statistical criterion and spatial dependence. *Accident Analysis and Prevention* (37), 699-720.
- MIRANDA-MORENO, L.F., 2006. *Statistical models and methods for the identification of hazardous locations for safety improvements*. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Waterloo.
- MIRANDA-MORENO, L.F., LABBE, A., FU, L., 2007. Bayesian multiple testing procedures for hotspot identification. *Accident Analysis and Prevention* 39(6), 1192-1201.
- MONTELLA, A., 2010. A comparative analysis of hotspot identification methods. *Accident Analysis and Prevention* 42(2), 571-581.
- OKABE, ATSUYUKI, TOSHIAKI, S., KOKICHI, S., 2009. A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool. *International Journal of Geographical Information Science* 23 (1), 7-32.

- ORD, J. K., GETIS, A., 1995. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical Analysis* 27(4), 286-306.
- PERSAUD, R.N., HAUER, E., 1984. Comparison of two methods for debiasing before-and-after accident studies. *Transportation Research Record* 975, 43-49.
- PERSAUD, B., 2001. Statistical methods in highway safety analysis. NCHRP Synthesis 295, *Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- SILVERMAN, B. W., 1986. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Chapman and Hall, New York, USA, P. 175.
- SORENSEN, M., ELVIK, R., 2008. *Black spot management and safety analysis of road networks. Best Practice Guidelines and Implementation Steps*, 6th Framework Programme Ripcord Iserest Deliverable.
- SWEROAD, 2001. 'Ulusal Trafik Güvenliği Programı', Türkiye Cumhuriyeti Karayolu İyileştirme ve Trafik Güvenliği (KİTĞİ), Trafik Güvenliği Projesi, Ankara. In Turkish.
- TARKO, A.P., KANODIA, M., 2004. Hazard elimination program. Manual on Improving Safety of Indiana Road Intersections and Sections. *Report FHWA/IN/JTRP-2003/19*, West Lafayette, Indiana.
- TNP (*Turkish National Police*), 2013. <http://www.trafik.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler/Genel-Kaza.aspx>
- WHO, 2013. *Global Status Report on Road Safety 2013*. Supporting a Decade of Action.
- XIE, Z., YAN, J., 2013. Detecting traffic accident clusters with network kernel density estimation and local spatial statistics: an integrated approach. *Journal of Transport Geography* 31, 64-71.

(Recebido em setembro de 2014. Aceito em novembro de 2014).

DETERMINISTICALLY-MODIFIED INTEGRAL ESTIMATORS OF GRAVITATIONAL TENSOR

Estimadores integrais determinísticos modificados do tensor gravitacional

MOHSEN ROMESHKANI^{1,*}
MEHDI ESHAGH²

¹Islamic Azad University, Qazvin branch, Qazvin, Iran

²Department of Engineering Science, University West, Trollhättan, Sweden
Email: mehdi.eshagh@hv.se

ABSTRACT

The Earth's global gravity field modelling is an important subject in Physical Geodesy. For this purpose different satellite gravimetry missions have been designed and launched. Satellite gravity gradiometry (SGG) is a technique to measure the second-order derivatives of the gravity field. The gravity field and steady state ocean circulation explorer (GOCE) is the first satellite mission which uses this technique and is dedicated to recover Earth's gravity models (EGMs) up to medium wavelengths. The existing terrestrial gravimetric data and EGM scan be used for validation of the GOCE data prior to their use. In this research, the tensor of gravitation in the local north-oriented frame is generated using deterministically-modified integral estimators involving terrestrial data and EGMs. The paper presents that the SGG data is assessable with an accuracy of 1-2 mE in Fennoscandia using a modified integral estimator by the Molodensky method. A degree of modification of 100 and an integration cap size of 2.5° for integrating $5' \times 5'$ terrestrial data are proper parameters for the estimator.

Keywords: Isotropic Kernels; Gravity Anomalies; Gravity Gradients; Modification; Simulation of Gravitational Tensor; Truncation Coefficients.

RESUMO

O modelo de campo de gravidade global da Terra é um assunto importante na geodésia física. Para este propósito, diferentes missões de satélites gravimétricos

*E-mail address: Romeshkani@yahoo.com (M. Romeshkani).

têm sido construídas e lançadas. A gravimetria da gravidade de satélite – SGG – é uma técnica para medir os “derivativos de segunda ordem” do campo da gravidade. O campo de gravidade é a exploração da circulação do oceano em estado de equilíbrio pelo – GOCE- primeira missão com satélite que usa esta técnica e é dedicada para readquirir os modelos de gravidade da Terra – EGMs – em ondas de tamanho médio. Os dados gravimétricos terrestres existentes e os de varredura – EGM são usados para validar os dados do GOCE antes de serem usados. Nesta pesquisa, o tensor de gravitação na estrutura local orientada ao Norte argumenta que os dados SGG – gradiometria da gravidade de satélite – é acessível com uma precisão de 1 – 2 m. E em Fennoscândia usando um estimador integral modificado pelo método de Molodensky. O grau de modificação de 100 e uma integração no tamanho de 2.5° para a integrada de 5' x 5' de dados terrestres são parâmetros apropriados para o estimador.

Palavras-chave: Núcleo isotrópico; da gravidade; gradiente gravitacional; modificação; simulador de tensor gravitacional; coeficiente de truncamento.

1. INTRODUCTION

Satellite gravity gradiometry (SGG) is a space method for recovering the Earth's gravity field from the second-order derivatives of the field. Delivering Earth's gravity models (EGMs) with higher resolution than those recovered from former satellite gravimetry techniques is expected from these data. The gravity field and steady-state ocean circulation explorer (GOCE) mission (BALMINO et al. 1998, 2001, ESA 1999, ALBERTELLA et al. 2002, RUMMEL et al. 2002, DRINKWATER et al. 2003) was successfully launched on 17th March 2009 as the first satellite mission which used the SGG technique. So far GOCE has delivered EGMs to degree and order 250 corresponding to a resolution of 60 km by 60 km. The second-order derivatives of the gravity field is measured by a gradiometer mounted on the GOCE spacecraft and validation of them is very important prior to their use for any purpose. Having erroneous observations leads to the deviation of the recovered gravity field from the true one and wrong interpretation for the geophysical phenomena.

Numerous studies have been done in the Earth's gravity field modelling from SGG for years, but the idea of validating the SGG data was presented in a few different ways. In the following we divide the validation methods into two different categories:

a) Validation of GOCE products

Today, the concentrations of the geodetic researchers are on the evaluation of the GOCE products determined by three different methods of time-wise (TIM), space-wise (SPW) and direct (DIR); see Pail et al. (2011). Hirt et al. (2011) compared some of GOCE EGMs with terrestrial gravimetric data over Switzerland, Austria and astrogeodetic deflections over Europe. They observed some improvements between degrees 160–165 and 180–185. Gruber et al. (2011)

compared some of the GOCE EGMs for reproducing the orbit of the Gravity recovery and Climate Experiment (GRACE) (Tapley et al. 2005) and concluded that they do not outperform the GRACE orbit; therefore, combination of GRACE and GOCE data is useful. They found significant improvements between degrees 50 and 200 for geoid computation goal. Janak and Pitonak (2011) evaluated the GOCE products in central Europe and Slovakia. They mentioned that TIM2 and SPW2 to degree 210 are much better than the previous releases to the same degree and GOCO02S (GOIGINGER et al. 2011) has a significant improvement comparing to GOCO01S (PAIL et al. 2010). Sprlak et al. (2012) did the same study in Norway and mentioned that the direct solutions are highly affected by a priori information and time-wise solution is more reliable. Abdalla et al. (2012) evaluated the GOCE EGMs in Sudan and concluded that the SPW1, SPW2, TIM1, TIM2 and GOCO01S are consistent with the local data. Abdalla and Tenzer (2012) validated EGMs in New Zealand. Guimaraes et al. (2012) tested the EGMs in Brazil and found out that TIM3 is much better than the previous ones, as expected. Eshagh and Ebadi (2013) also investigated different EGMs and evaluated them over Fennoscandia. So far evaluation of the GOCE EGMs was done based on comparison of the EGM products with external sources of data, like gravity anomaly, disturbing gravity, geoid and/or astrogeodetic deflections. However, it should be considered that the errors of EGMs have been also presented. Wanger and McAdoo (2012) noticed that the errors of GOCE EGMs are not realistic and tried to calibrate them based on EGM08 (Pavlis et al., 2008, 2012). Eshagh (2013) studied the reliability and calibration of GOCE EGMs as well. Eshagh and Ebadi (2014) presented a method for error calibration of some GOCE EGMs based on condition adjustment models.

b) On board validation of GOCE data

Bouman et al. (2003) has set up a calibration model based on the instrument (gradiometer) characteristics to validate the SGG data. Bouman and Koop (2003) presented an along-track interpolation method to detect the outliers. Their idea is to compare the along-track interpolated gradients with measured gradients. If the interpolation error is small enough, the differences should be predicted reasonably by an error model. Also, Bouman et al. (2004) concluded that the method of validation using high-low satellite-to-satellite tracking data fail unless a high-resolution EGM is available. Kern and Haagmans (2004) and Kern et al. (2005) presented an algorithm for detecting the outliers in the SGG data in the time domain.

c) Validation of GOCE data by external sources of data

The simplest method is the direct comparison of the observed SGG data with the generated ones using an existing EGM; (see ESHAGH and ABDOLLAHZADEH 2010, 2011). Also, Haagmans et al. (2002) and Kern and Haagmans (2004) used the extended Stokes and Hotine formulae for using the terrestrial gravimetric data for this purpose. Mueller et al. (2004) used the terrestrial gravity anomalies to generate them, and after that Wolf (2007) investigated the deterministic approaches to modify the integrals and validation. In fact, the spectral weighting scheme

(SJÖBERG 1980 and 1981 and WENZEL 1981) was used by Wolf (2007). Least-squares collocation (LSC) can be used for the same purpose and Tscherning et al. (2006) considered this method and concluded that the SGG data are predictable with an error of 2-3 mE in the case of an optimal size of the collection area and optimal resolution of the data. Zielinski and Petrovskaya (2003) proposed a balloon-borne gradiometer to fly at 20-40 km altitude simultaneously with satellite mission and proposed downward continuation of satellite data and comparing them with balloon-borne data. Pail (2003) proposed a combined adjustment method supporting high quality gravity field information within the well-surveyed test area for the continuation of the local gravity field upward and validating the SGG data. Bouman et al. (2004) stated that there were some limitations in generating the SGG data using terrestrial gravimetry data and the EGMs. When such a model is used, higher degrees and orders of EGMs should be taken into account and the recent ones seem to be able to remove the greater part of the systematic errors. In their regional approach, they concluded that the bias of the SGG data can be recovered very well using LSC. Toth et al. (2005) investigated the generation of the SGG data using the Torsion balance data by LSC. Jarecki et al. (2006) did a similar study but by LSC and integral formulae without any modification. Sprlak and Novak (2014a) used the deflections of vertical for generating the gravity gradients at satellite level, also Sprlak and Novak (2014b) found integral relations between the GOCE and GRACE types of data which can be used for validation purpose of their data. The stochastic modification was used by Eshagh (2010a) to modify the second-order radial derivative of the extended Stokes formula. He proposed two methods of a) modification prior to derivative and b) derivative prior to modification. The former method is similar to the work done by Mueller et al. (2004) and Wolf (2007) but not in deterministic way of modification. Eshagh (2010b) also modified the second-order radial derivative of the Abel-Poisson formula in a least-squares sense to generate the second-order radial gradient at satellite level using an EGM and geoid model. The least-squares modification of the vertical-horizontal and horizontal-horizontal derivatives of the extended Stokes formula was done by Eshagh and Romeshkani (2011) and Romeshkani (2011) based on the theoretical study done for the possibility of this idea by Eshagh (2009a).

d) The present work

This paper is very similar to the work presented by Eshagh and Romeshkani (2011) with the difference of investigating the deterministic methods of modifying the integral estimators for generation of the SGG data instead of the stochastic ones. This study is important as the deterministic methods are much simpler than stochastic ones as they are solely dependent on the integration domain and not the quality of the data. However, this method is not optimal in statistical point of view. Wolf (2007) has done some studies about validation of the SGG data using integral formulae modified deterministically, but she considered limited number of methods for this goal. Here, we consider methods of Molodensky (1962), Vanicek-Kleusberg (1987), Meissl (1971), Heck and Grunningar (1987), Featherstone et al. (1998),

Wong and Gore (1969) methods for modifying the integral estimators for generating the SGG data from the gravity anomalies at sea level.

2. SATELLITE GRAVITY GRADIOMETRY OBSERVABLES

The gravitational tensor contains second-order derivatives of the gravitational field. Geocentric frame, local north-oriented frame (LNOF), orbital frame, gradiometer frame are some well-known ones for studying this tensor.

Here and after, we use the LNOF in our mathematical presentations, which is defined as the frame whose *z*-axis is pointing upwards in the geocentric radial direction, the *x*-axis towards the north and the frame is right-handed, implying that they-axis is directed to the west. Having considered harmonicity of the gravitational potential, the gravitational tensor contains 5 independent elements. GOCE measured the second-order derivatives of gravitational potential, but since our goal is to use the gravity anomalies at sea level, we consider the derivatives of the disturbing potential (*T*). However, by removing the contribution of the normal gravity field from GOCE data, we can derive the second-order derivatives of *T*. In this study, we use *T*, and therefore, T_{zz} is named vertical-vertical (VV) gradient as it is the second-order derivative of *T* in the direction of the *z*-axis. The non-diagonal elements T_{xz} and T_{yz} are called vertical-horizontal (VH) gradients, as they are got from vertical and horizontal derivatives. The elements T_{xx} , T_{yy} and T_{xy} are called horizontal-horizontal (HH) gradients as there is no derivative in the direction of the *z*-axis.

A gradient estimator is an integral formula connecting the gravity anomaly at sea level to gradients at satellite level. Due to the limited coverage of the terrestrial data, such integral formulae should be modified in such a way that the contribution of the far-zone data is minimised. Here, we use some deterministic approaches to modify the estimators and test their successfulness for the validation of VV, VH and HH gradients. Below we present these integral estimators and we call them VV, VH and HH estimators, respectively (see e.g. ESHAGH and ROMESHKANI 2011):

$$\tilde{T}_{zz} = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma_0} K_0(r, \psi) \Delta g' d\sigma + \frac{R}{2} \sum_{n=2}^L b_n^0 \Delta g_n \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{T}_{xz} \\ \tilde{T}_{yz} \end{pmatrix} = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma_0} K_1(r, \psi) \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix} \Delta g' d\sigma + \frac{R}{2} \sum_{n=2}^L b_n^1 \begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta g_n}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \Delta g_n}{\sin\theta \partial \lambda} \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{T}_{xx} & -\tilde{T}_{yy} \\ 2\tilde{T}_{xy} \end{pmatrix} = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma_0} K_2(r, \psi) \begin{pmatrix} \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha \end{pmatrix} \Delta g' d\sigma + \frac{R}{2} \sum_{n=2}^L b_n^2 \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Delta g_n}{\partial \theta^2} - \cot \theta \frac{\partial \Delta g_n}{\partial \theta} - \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \Delta g_n}{\partial \lambda^2} \\ 2 \left(\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 \Delta g_n}{\partial \theta \partial \lambda} - \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} \frac{\partial \Delta g_n}{\partial \lambda} \right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

where ψ is the geocentric angle between the integration and the computation points, σ_0 the integration domain, $\Delta g'$ the gravity anomaly at sea level and at the integration points, $d\sigma$ the surface integration elements α is the azimuth between the integration and computation points. b_n^0 , b_n^1 and b_n^2 are the parameters which are estimated according to the modification type. Δg_n is the Laplace harmonics of Δg at the computation point located at sea level. λ and θ are the longitude and the co-latitude of the computation point. Furthermore,

$$K_i(r, \psi) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2n+1}{2} \Omega_n^i P_n(\cos \psi), \quad i = 0, 1 \text{ and } 2 \quad (4)$$

is the kernel of the integral terms and i is a coefficient to specify the type of the integral estimator, i.e. when $i = 0$ the estimator is related to T_{zz} , when $i = 1$ to T_{xz} and T_{yz} and when $i = 2$ to T_{xx} , T_{yy} and T_{yx} . Also,

$$\Omega_n^0 = \frac{2}{n-1} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1}, \quad \Omega_n^1 = (n+2)\Omega_n^2 \quad \text{and} \quad \Omega_n^2 = \frac{\Omega_n^0}{r^2} \quad (5)$$

where R is the radius of the reference sphere, r the geocentric distance at the computation point and $P_{ni}(\cos \psi)$ is the associated Legendre function of degree n .

3. DETERMINISTIC MODIFICATION OF KERNELS

Stokes's (1849) solution to the geodetic boundary-value problem requires a global integration to compute the geoid height. To compute a geoid model by locally-limited data, Molodensky (1958) proposed an approach to minimise the

contribution of far-zone data. In fact, he presented the first deterministic modification method for the Stokes's formula. After him, de Witte (1967); Wong and Gore (WG) (1969), Meissl (1971), Heck and Gruninger (HG) (1987), Vanicek and Kleusberg (VK) (1987), Vanicek and Sjöberg (1991), Featherstone et al. (FEO) (1998), Evans and Featherstone (2000) invented different deterministic methods for the same purpose. In Table 1, we summarise some of these methods which are developed for the SGG data and the estimators presented in Eqs. (3a)- (3c). In fact, this table presents the mathematical formulae of the modified kernels based on each deterministic approach and the truncation coefficient of the corresponding integral formulae.

Table 1 - Mathematical formulae of modified kernels and truncation coefficients of corresponding integral formulae according to methods of Meissl, Wong and Gore (WG), Heck and Gruninger (HG), Molodensky (Mol), Vanicek and Kleusberg (VK), and Featherstone, Evans and Oliver (FEO).

	Modified Kernel	Q_n^M
Meissl	$K_i(r, \psi) = \begin{cases} S_i(r, \psi) - S_i(r, \psi_0) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_0 \\ 0 & \text{for } \psi_0 < \psi < \pi \end{cases}$	$\sum_{l=2}^{\infty} \Omega_l^i (E_{nl}^i - E_{nl}^{i_0})$
WG	$K_i(r, \psi) = S_i(r, \psi) - \sum_{n=2}^p \frac{2n+1}{2} \Omega_n^i P_{ni}(\cos \psi)$	$\sum_{l=p+1}^{\infty} \Omega_l^i (E_{nl}^i)$
HG	$K_i(r, \psi) = \begin{cases} S_i^p(r, \psi) - S_i^p(r, \psi_0) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_0 \\ 0 & \text{for } \psi_0 < \psi < \pi \end{cases}$	$\sum_{l=p+1}^{\infty} \Omega_l^i (E_{nl}^i - E_{nl}^{i_0})$
Mol	$K_i(r, \psi) = S_i(r, \psi) - \sum_{n=2}^M \frac{2n+1}{2} s_n^i P_{ni}(\cos \psi)$	$\sum_{l=p+1}^{\infty} s_n^i (E_{nl}^i)$
VK	$K_i(r, \psi) = \begin{cases} S_i^p(r, \psi) - \sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} s_k^i P_{ki}(\cos \psi) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_0 \\ 0 & \text{for } \psi_0 < \psi < \pi \end{cases}$	$\sum_{l=p+1}^{\infty} \Omega_l^i (E_{nl}^i) - \sum_{k=2}^L s_k^i (E_{nk}^i)$
FEO	$K_i(r, \psi) = \begin{cases} S_i^{p,L}(r, \psi) - S_i^{p,L}(r, \psi_0) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_0 \\ 0 & \text{for } \psi_0 < \psi < \pi \end{cases}$	$\sum_{l=p+1}^{\infty} \Omega_l^i (E_{nl}^i - E_{nl}^{i_0}) - \sum_{k=2}^L s_k^i (E_{nk}^i - E_{nk}^{i_0})$

The mathematical formulae of E_{nk}^i , presented in Table 1, are:

$$E_{nk}^i = \frac{2k+1}{2} \frac{1}{u_k^i} e_{nk}^i \quad \text{and} \quad E_{nk}^{i'} = \frac{2k+1}{2} \frac{1}{u_k^i} e_{nk}^{i'} \quad (6)$$

where

$$e_{nk}^i = \int_{\psi_0}^{\pi} P_{ni}(\cos \psi) P_{ki}(\cos \psi) \sin \psi d\psi \quad \text{and}$$

$$e_{nk}^{i'} = \int_{\psi_0}^{\pi} P_{ni}(\cos \psi) \sin \psi d\psi, \quad i=0, 1 \text{ or } 2, \quad (7)$$

are the Paul coefficients of order 0, 1 and 2 and Paul (1973) proposed a recursive formula to generate zero-order one. Eshagh (2010b) presented the following recursive formulae for the first- and second-order Paul coefficients:

$$e_{nk}^1 = n(n+1)e_{nk}^0 + n P_k(P_{n-1} - (\cos \psi_0) P_n) \quad (8)$$

$$e_{nk}^2 = 2 \cos \psi_0 P_{n1} P_{n1} + (n(n+1) - 2) e_{nk}^1 + n(n+1) (1 - \cos^2 \psi_0)^{1/2} P_n P_{k1}. \quad (9)$$

and finally we have:

$$u_k^i = \begin{cases} 1 & i = 0 \\ k(k+1) & i = 1 \\ (k-1)k(k+1)(k+2) & i = 2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} E_{nk}^i s_k^i = (Q_n^L)^i \quad (11)$$

$$\sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} E_{nk}^i s_k^i = Q_n^i - \sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{k-1} E_{nk}^i \quad (12)$$

4. NUMERICAL INVESTIGATIONS

In order to perform a numerical investigation into the estimation of the SGG data at the 250 km level, the EIGEN-51C geopotential model (Bruinsma et al. 2010) is used as a reference EGM for generating the gravity anomaly and gravity gradients for our simulation study. The aim is to use the gravity anomalies and the deterministically-modified integral estimators to produce the SGG data and compare their corresponding ones to those generated by the EGM. Through this study, the Tscherning-Rapp's (1974) model is used for generating the signal spectra of the gravity anomaly. Eshagh (2009c) showed that the results of the modification of the Stokes formula in the case of using this model and EGM08 (Pavlis et al. 2008) are

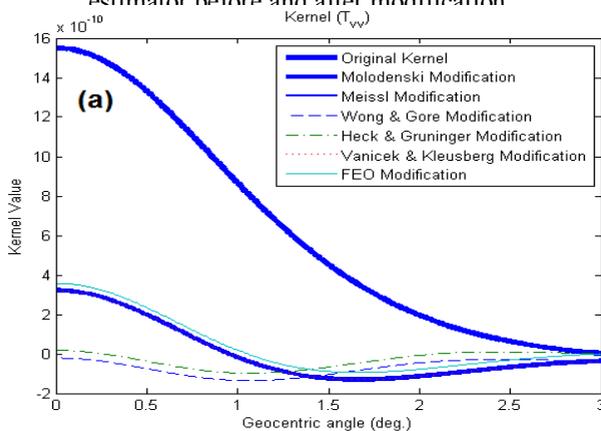
more or less the same and there is no need to use EGM08 for generating the signal spectra. The truncation coefficients of the estimators are simply generated by their spectral forms. Eshagh (2010a) showed that because of the inclusion of the parameters Ω_n^0 , Ω_n^1 and Ω_n^2 the series will be convergent due to the elevation of the satellite, but the series should be used to high degrees. He showed that a maximum degree of 5000 should be enough for this purpose. He also discussed that the recursive formulae presented by Shepperd (1982) are not suitable when the data are of satellite type. Shepperd (1982) mentioned that his formulae might be used for the altitudes below 20 km.

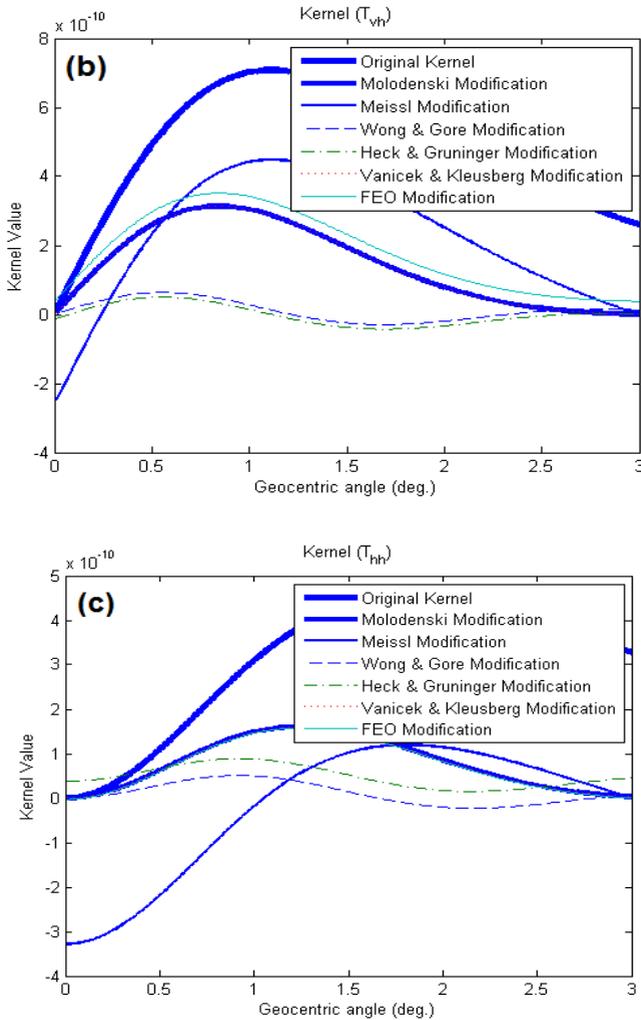
The cap size of integration and the degree of modification are two important factors which should be investigated for applying any integral formula and should be specified through different numerical studies. Therefore, we divide our numerical investigations into two parts, in the first part, the behaviours of the deterministically-modified kernels are presented, in the second one, the SGG data are generated using the gravity anomalies at sea level by using the modified integral estimators.

4.1 Behaviours of Isotropic Parts of the Modified Kernels

Now, the isotropic parts of the kernels of the integral estimators (1), (2) and (3) are presented. The significance of the far-zone gravity anomalies depends on these parts of the kernels. Plotting these isotropic functions shows that whether the modification has been done successfully or not. Also, it can somehow give an idea about the significance of the data being integrated and the cap size of integration. Eshagh (2014) mentioned that the contribution of the far-zone data was also dependent on the type of the data being integrated.

Figure 1 - Isotropic parts of kernels of the (a) VV,(b) VH and (c) HH integral estimator before and after modification





Figures 1a, 1b and 1c present the behaviours of the isotropic parts of the kernels of the VV, VH and HH estimators. A cap size (ψ_0) of 3° and a degree of modification (L) of 150 have been selected in all of the modification processes. These figures illustrate that the modified kernels by the WG and HG methods have similar behaviours. According to these two modified kernels, the contribution of terrestrial data in the integral term of the estimator is less than the second term

presented by a series. Therefore, ψ_0 plays a less significant role, but the opposite is true for the degree modification.

The modified kernels by the VK and Mol modifications are almost coincided and show that the terrestrial data have the same contribution in their corresponding estimators. Featherstone (2003) presented that the fluctuation of the spheroidal Stokes kernel is because of the oscillations of the low-degree Legendre polynomials, and this fluctuation grows with the degree of spheroidal modification. Large oscillations of the kernels cause difficulties in their numerical implementations of the integral part of the estimators. Since the value of the non-modified kernels at the rim of integration cap that is close to zero, therefore, the modified kernel by the Meissl method almost coincides the original kernel.

The values of the non-modified kernels of the HH and VH estimators are not small at the rim of ψ_0 therefore the modified kernels by the Meissl method deviate from the non-modified ones. In fact, the Meissl modification needs to determine ψ_0 by minimising the mean squared error of the estimator in a least-square sense. Because of the limited coverage of the terrestrial data this is not always useful. To achieve the minimum mean squared error, we take its derivative respect to $S(r, \psi_0)$ and equate the result to zero (SJÖBERG and HUNEGNAW 2000). For minimising the contribution of the far-zone terrestrial data in the modified estimators, the kernel values should be close to zero outside the integration domain. As can be seen, Figure 1 shows this issue for the modified kernels, by comparing them to the original ones, especially for the modified kernels of the VH and HH estimators. This can somehow show that the modification processes have been successful. The system of equations from which the modification parameters are obtained is ill-conditioned for the VH and HH estimators (ESHAGH, 2010a). This is due to inclusion of u_k^i in the mathematical expressions of the elements of the coefficient matrix of the systems. u_k^i increases unboundedly and for large degree of modifications, the system will be even more unstable. However, this instability is harmless and modification of the estimators will be successful if a simple regularisation method is used for solving the system Eshagh (2010a).

4.2 Generation of Satellite Gravity Gradiometry Data Using Modified Integral Estimators Over Fennoscandia

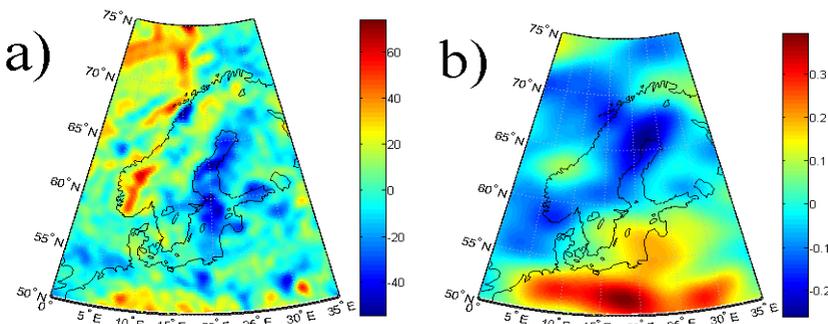
A grid of the terrestrial gravity anomalies is produced using the EIGEN-51C model to degree and order 360 with a resolution of $5' \times 5'$ at sea level in Fennoscandia, limited between the latitudes 50° N and 75° N and the longitudes 0° E and 35° E. The SGG data in the LNOF are generated using the same model and the nonsingular formulae of the gravity gradients presented by Eshagh (2009a,b). Here,

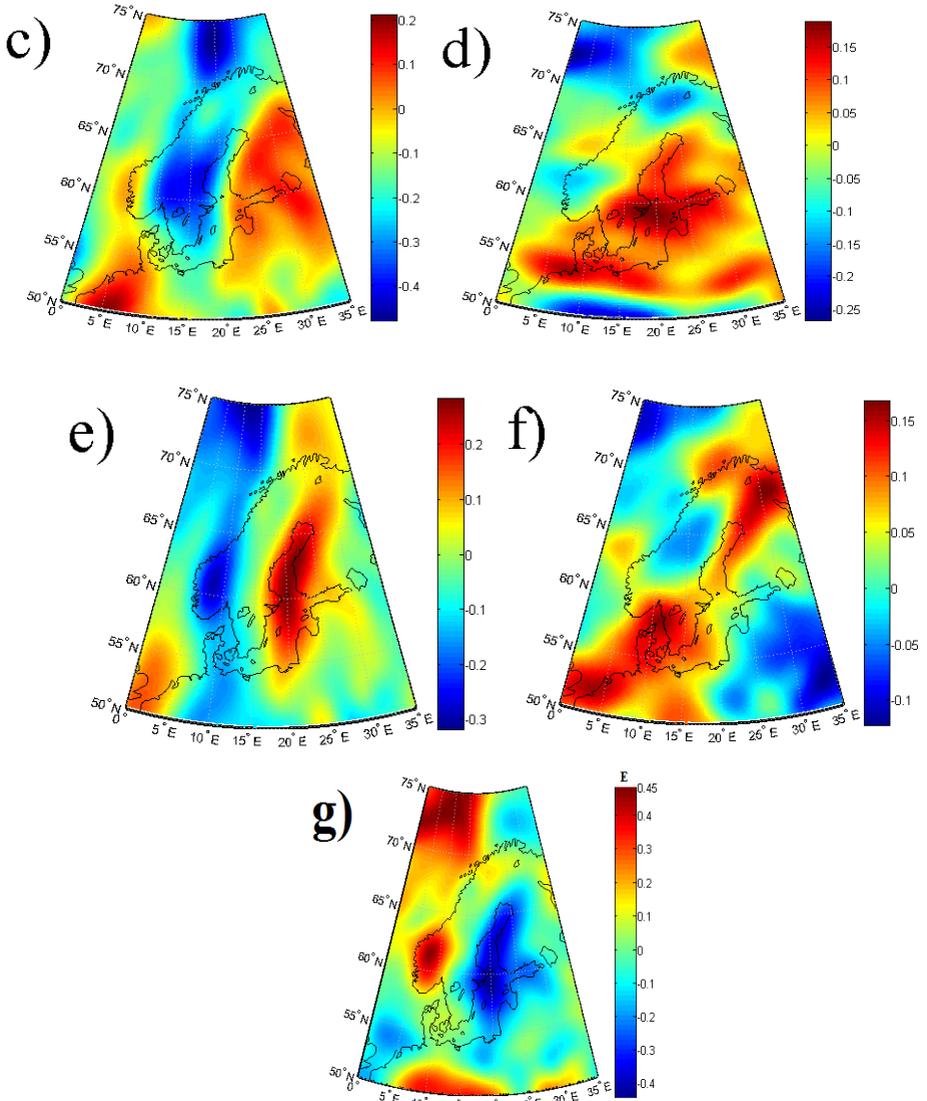
our idea is to regenerate them from the simulated gravity anomalies by using the modified integral estimators. It should be stated that, the use of EIGEN-51C to degree and order 360 is reasonable and any other EGM can be used in this respect. However, we cannot expect to recover the all frequencies to degree and order 360 due to the satellite elevation. The GOCE EGMs have been computed to degree and order 250. We have generated the gravity anomalies with a resolution of $5' \times 5'$ to reduce the discretisation error in the integration process but we know that recovering higher frequencies than 250 is not meaningful. Table 2 shows the statistics of the mentioned gravity anomalies and the SGG data at 250 km level and Figure 3 shows their maps over Fennoscandia.

Table 2 - Statistics of gravity anomalies and SGG data in Fennoscandia

	Max	Mean	Min	Std
T_{zz} (1 E)	0.430	-0.002	-0.455	0.187
T_{xz} (1 E)	0.391	0.000	-0.260	0.036
T_{yz} (1 E)	0.210	-0.136	-0.479	0.026
T_{xx} (1 E)	0.187	-0.011	-0.267	0.027
T_{yy} (1 E)	0.282	-0.028	-0.319	0.028
T_{xy} (1 E)	0.167	0.030	-0.122	0.017
Δg (1 mGal)	73.82	3.77	-54.69	3.88

Figure 3 - a) Gravity anomaly [mGal], b) T_{xz} [E], c) T_{yz} [E], d) T_{xx} [E], e) T_{yy} , f) T_{xy} [E] and g) T_{zz} (E)





The differences between the SGG data derived from the EIGEN-51C and those from the gravity anomalies are regarded as the external errors of the estimators. In the following, different ψ_0 and L , are considered and tested to find the best conditions for the successful generation of the SGG data.

4.3 Test of Cap Size of Integration and Degree of Modification

Table 3 (see appendix) presents the statistics of the differences between the generated SGG data using the integral estimators modified to degree $L = 150$ and different ψ_0 . Generally, it shows that the modified estimators can reproduce the SGG data with an error of about 1-2 mE. This level of error reduces insignificantly by increasing ψ_0 meaning that $\psi_0 = 2^\circ$ is sufficient for integrating the gravity anomalies. The large value of $L = 150$ causes that the estimators become insensitive to the choice of ψ_0 . The generation of $T_{xx} - T_{yy}$ is successful with an error of less than 2 mE by some estimators and again the anomalies seem to have no impact on the quality of the estimated $T_{xx} - T_{yy}$ and T_{xy} .

This means that the series terms of their estimators are stronger than the integral ones and have more contribution to the estimates. The estimators, modified by the Meissl, HG and WG methods have this property. The errors of the estimates, derived by the modified estimators by MOL, increase with increasing ψ_0 . The reason is the dependence of these components to the second terms of their corresponding estimators so that by increasing ψ_0 insignificant changes are seen in the results.

Here, we test different L to see if the choice of a smaller L is successful according to the selected ψ_0 . Having small L decreases the dependence of the estimators to the EGM and increases the contribution of the gravity anomalies in the integration domain.

Table 4 (see appendix) presents the statistics of the differences between the generated SGG data when $L = 75$.

It presents that the produced SGG data are more sensitive to ψ_0 than the case where $L = 150$, as expected. By selecting $L = 75$, the estimator will consider higher weight for the gravity anomalies than the EGM. Also, when $\psi_0 = 3^\circ$ then T_{zz} is generated with an error of less than 6 mE and T_{xz} with an acceptable accuracy level, T_{yz} with 5 mE error, but the rest of the SGG data with a lower accuracy level. One cannot find a method, which delivers the best results for all SGG data. As the table shows, the Molodensky modified estimators deliver almost the best estimates for T_{zz} , T_{xz} and T_{yz} .

Also, the contribution of the integral term of the estimators of $T_{xx} - T_{yy}$ and T_{xy} is too small therefore, the best results derived by those estimators whose series

terms are more precise and accurate. The estimators modified by the HG, WG and Meissl methods have this property. In the case of using the MOL method the error increases with increasing ψ_0 due to the dependency of the estimators to the EGM.

$\psi_0 = 3^\circ$ seems to be suitable for this purpose. Consequently, we keep this fixed and reduce L to find the best agreement between $\psi_0 = 3^\circ$ and L . Table 5 shows the results of this investigation.

Table 5 (see appendix) shows the statistics of the errors of the produced SGG data using the estimators modified with $\psi_0 = 3^\circ$ at different L . As the table presents, by increasing L from 75 to 100, the errors of T_{zz} , T_{xz} and T_{yz} reaches to 3 mE and T_{xy} to 7 mE. By considering $L=125$ even smaller errors are seen in the SGG data, which means that considering larger L is not necessary. However, for generating some of the SGG data $L=150$ is required. For reproducing the HH components $L=125$ and $\psi_0 = 3^\circ$ should be enough to reach to 2-3 mE error. As the table shows, the increase of L to 175 leads to errors less than 1 mE. In short, for producing the SGG data, $\psi_0 = 3^\circ$ and $L=150$ are suitable, but $\psi_0 = 3^\circ$ and $L=125$ can be suitable for some of the SGG data. In this table, the methods of WG and HG and Meissl exhibit best results when the contribution of the second terms increase with increasing L to 175.

Now, we can test ψ_0 versus $L > 75$. The results are presented in Table 6 (see appendix). ψ_0 is decreased to 2° and 2.5° and $L=100$ and $L=125$ are considered. From the table, one can reach to accuracies of about 1-2 mE for T_{xz} and T_{yz} ; and 2 mE for T_{zz} . Therefore, their modified integral estimators with $\psi_0 = 2.5^\circ$ and $L=100$ work properly. Also, when $L=125$ the SGG data an error of 2-3 mE can be produced with $\psi_0 = 2^\circ$ and $\psi_0 = 2.5^\circ$ for the VV and VH gradients. This means that $L=125$ is suitable and the estimator is sensitive enough to ψ_0 and subsequently to the gravity anomalies.

5. CONCLUDING REMARKS

The cap size of integration (ψ_0) and the degree of modification (L), which are two important parameters to be selected before using the estimators, should be $L=125$ and $\psi_0 = 2.5^\circ$, the VV gradient can be generated with an error less than 2 mE over

Fennoscandia. The choices of $L=150$ and $\psi_0 = 2.5^\circ$ lead to the same level of accuracy for the VH gradients and $L=125$ and $\psi_0 = 3^\circ$ for the HH gradients. Insignificant variations are seen in the quality of the generated gradients due to changes in the resolution of the terrestrial gravity anomalies. Our numerical studies show that, in most cases, the Molodenski modification delivers better results than the rest of the deterministic modification methods.

REFERENCES

- ABDALLA, A. and TENZER, R. The global geopotential and regional gravimetric geoid/quasigeoid models testing using the newly adjusted levelling dataset for New Zealand. *Applied Geomatics*. 2012.
- ABDALLA A., FASHIR H. H., ALI A. and FAIHEAD D. Validation of recent GOCE/GRACE geopotential models over Khartoum state-Sudan, *Journal of Geodesy and Sciences*. 2(2): 88-97. 2012.
- ALBERTELLA A., MIGLIACCIO F., and SANSÒ F. GOCE: The Earth Field by Space Gradiometry. *Celestial Mechanics and Dynamic Astronomy*, 83, 1-15. 2002.
- BALMINO G., PEROSANZ F., RUMMEL R., SNEEUW N., SÜNKEL H. AND WOODWORTH P., European Views on Dedicated Gravity Field Missions: GRACE and GOCE. An Earth Sciences Division *Consultation Document*, ESA, ESD-MAG-REP-CON-001. 1998.
- BALMINO G., PEROSANZ F., RUMMEL R., SNEEUW N. and SÜNKEL H. CHAMP, GRACE and GOCE: Mission Concepts and Simulations. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 40, 3-4, 309-320. 2001.
- BOUMAN, J., KOOP, R. Error assessment of GOCE SGG data using along track interpolation. *Advanced Geoscience*. 1, 27–32. 2003.
- BOUMAN, J., KOOP, R., HAAGMANS, R., MULLER, J., SNEEUW, N. TSCHERNING, C.C., VISSER, P. Calibration and validation of GOCE gravity gradients, *Paper presented at IUGG meeting*, pp. 1–6. 2003.
- BOUMAN, J., KOOP, R., TSCHERNING, C.C., VISSER, P. Calibration of GOCE SGG data using high-low STT, terrestrial gravity data and global gravity field models. *Journal of Geodesy*. 78, 124–137. 2004.
- BRUINSMA S.L., MARTY J.C., BALMINO G., BIANCALE R., FOERSTE C., ABRIKOSOV O. (1) and NEUMAYER H.(1). GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical Method, presented at the *ESA Living Planet Symposium 2010*, Bergen, June 27 - July 2 2010, Bergen, Norway.
- DRINKWATER, M.R., FLOBERGHAGEN R., HAAGMANS R., MUZI D., and POPESCU A GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission. In Beutler, G.B., Drinkwater M., Rummel R., and von Steiger R. (Eds.), *Earth Gravity Field from Space - from Sensors to Earth Sciences*. *In the Space Sciences*

- Series of ISSI*, Vol. 18, 419-432, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, ISBN: 1-4020-1408-2 (pdf, 520 Kb). 2003.
- ESA Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission, ESA SP-1233(1), Report for mission selection of the four candidate earth explorer missions. *ESA Publications Division*, pp. 217, July, 1999.
- ESHAGH M. *On satellite gravity gradiometry*, Doctoral dissertation in Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. 2009a
- ESHAGH M. Alternative expressions for gravity gradients in local-north oriented frame and tensor spherical harmonics, *Acta Geophysica*, 58, 215-243. 2009b.
- ESHAGH M. Least-squares modification of Stokes' formula with EGM08, *Journal of Geodesy and Cartography*, 35(4): 111–117. 2009c.
- ESHAGH M. Least-squares modification of extended Stokes' formula and its second-order radial derivative for validation of satellite gravity gradiometry data, *Journal of Geodynamics*, 49, 92-104. 2010a.
- ESHAGH M. Towards validation of satellite gradiometric data using modified version of 2nd order partial derivatives of extended Stokes' formula, *Artificial Satellites*, 44, 4, 103-129. 2010b.
- ESHAGH M. On the reliability and error calibration of some recent Earth's gravity models of GOCE with respect to EGM08, *Acta of Geodesy and Geophysic. Hung.*, 48(2): 199-208. 2013.
- ESHAGH M. From tensor to vector of gravitation, *Artificial Satellites*, (accepted). 2014.
- ESHAGH M. and ABDOLLAHZADEH M. Semi-vectorization: an efficient technique for synthesis and analysis of gravity gradiometry data. *Earth Science Informatics.*, 3, 149-158. 2010.
- ESHAGH M. and ABDOLLAHZADEH M., Software for generating gravity gradients using a geopotential model based on irregular semi-vectorization algorithm. *Computer and Geoscience.*, 32, 152-160. 2011.
- ESHAGH M. and EBADI S. Geoid modelling based on EGM08 and the recent Earth gravity models of GOCE, *Earth Science. Inf.* 6:113-125. 2013.
- ESHAGH and EBADI. A strategy to calibrate errors of earth gravity models, *Journal of Applied Geophysics.* 103, 215–220. 2014.
- ESHAGH M. and ROMESHKANI M. Generation of vertical-horizontal and horizontal-horizontal gravity gradients using stochastically modified integral estimators. *Advances in Space Research*, 48, 1341–1358. 2011.
- EVANS JD, FEATHERSTONE WE Improved convergence rates for the truncation error in geoid determination. *Journal of Geodesy*, 74: 239-248. 2000.
- FEATHERSTONE W.E., EVANS J.D. and OLLIVER J.G. A Meissl modified Vanicek and Kleusberg kernel to reduce the truncation error in gravimetric geoid computations. *Journal of Geodesy*, 72, 3, 154–160. 1998.
- FEATHERSTONE W.E. Software for computing five existing types of deterministically modified integration kernel for gravimetric geoid determination, *Computers & Geosciences*, 29, 183-193. 2003.

- GOIGINGER H., HÖCK E., RIESER D., MAYER-GÜRR T., MAIER A., KRAUSS S., PAIL R., FECHER T., GRUBER T., BROCKMANN J.M., KRASBUTTER I., SCHUH W.-D., JÄGGI A., PRANGE L., HAUSLEITNER W., BAUR O., KUSCHE J. The combined satellite-only global gravity field model GOCO02S, presented at the 2011 *General Assembly of the European Geosciences Union*, Vienna, Austria, April 4-8, 2011. 2011.
- GUIMARAES G.N., MATOS A. C. O. C. and BILTZKOW D. An evaluation of recent GOCE geopotential models in Brazil, *Boletim de Ciências Geodésicas*. 2(2): 144-155. 2012.
- HAAGMANS R. PRIJATNA K. and OMANG O. An alternative concept for validation of GOCE gradiometry results based on regional gravity, In *Proc. Gravity and Geoid 2002*, GG2002, August 26-30, Thessaloniki, Greece. 2002.
- HECK B. and GRUNINGER W. Modification of Stokes's integral formula by combining two classical approaches. *Proceedings of the XIX General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*, 2. Vancouver, Canada, pp. 309-337. 1987.
- HIRT C., GRUBER T. and FEATHERSTONE W.E. Evaluation of the first GOCE static gravity field models using terrestrial gravity, vertical deflections and EGM2008 quasigeoid heights, *Journal of Geodesy*. 85: 723-740. 2011.
- JANAK J and PITONAK M. Comparison and testing of GOCE global gravity models in central Europe, *Journal of Geodesy and Science*. 1(4): 333-347. 2011.
- JARECKI F., KAREN K.I., WOLF, H. DENKER and J. MULLER. Quality Assessment of GOCE Gradients, *Observation of the Earth System from Space 2006*, pp 271-285. 2006.
- KERN M. and HAAGMANS R. Determination of gravity gradients from terrestrial gravity data for calibration and validation of gradiometric GOCE data, In *Proc. Gravity, Geoid and Space missions*, GGSM 2004, *IAG International symposium*, Portugal, August 30- September 3, pp. 95-100. 2004
- KERN M., PREIMESBERGER T., ALLESCH M., PAIL. R., BOUMAN J. and KOOP R. Outlier detection algorithms and their performance in GOCE gravity field processing, *Journal of Geodesy*, 78, 509-519. 2005.
- MEISSL P. Preparations for the numerical evaluation of second-order Molodenskii-type formulas. *Report 163*, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, OH, 72pp. 1971.
- MOLODENSKY M.S., EREMEEV V.F. and YURKINA M.I. *Methods for study of the external gravity field and figure of the Earth*. Translated from Russian (1960), Israel program for scientific translation, Jerusalem. 1962.
- MOLODENSKY, M.S., *Grundbegriffe der Geodatischen Gravimetrie*. VEB Verlag Technik, Berlin. 1958.
- MÜLLER J., DENKER H., JARECKI F. and WOLF K.I. Computation of calibration gradients and methods for in-orbit validation of gradiometric GOCE data. In: Lacoste H. (Ed.), *Proceedings of the Second International*

- GOCE User Workshop "GOCE, The Geoid and Oceanography"*, 8-10 March 2004, ESA/ESRIN, Frascati, Italy. ESA SP-569, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands. 2004.
- PAIL, R. Local gravity field continuation for the purpose of in-orbit calibration of GOCE SGG observations. *Advanced Geoscience*. 1, 11–18. 2003.
- PAIL R., GOIGINGER H., SCHUH W.D., HOECK E., BROCKMANN J.M., FECHER T., GRUBER T., MAYER GUERR T., KUSCHE J., JAEGGI A. and RIESER D. Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE, *Geophysics Resolution Letter.*, 37, L20314. 2010.
- PAIL R., BRUINSMA S., MIGLIACCIO F., FOERSTE C. GOIGINGER H., SCHUH W. D., HOECK E., REGUZZONI M., BROCKMANN J. M., ABRIKOSOV O., VEICHERT M., FECHER T., MAYRHOFER R., KRASBUTTER I., SANZO F. and TSCHERNING C.C. First GOCE gravity field models derived by three different approaches, *Journal of Geodesy*. 85: 819-843. 2011.
- PAUL M.K. A method of evaluating the truncation error coefficients for geoidal height, *Bulletin Geodesique*, 110, 413-425. 1973.
- PAVLIS N., HOLMES SA., KENYON S. C. and FACTOR JK. An Earth Gravitational model to degree 2160: EGM08. *Presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union*, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.
- ROMESHKANI M., *Validation of GOCE Gravity Gradiometry Data Using Terrestrial Gravity Data*. M.Sc. Thesis, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran. 2011.
- RUMMEL R., BALMINO G., JOHANNESSEN J., VISSER P. and WOODWORTH P. Dedicated gravity field missions-principles and aims, *Journal of Geodynamics*, 33:3-20. 2002.
- SHEPPERD S. W.) A recursive algorithm for evaluating Molodeski-type truncation error coefficients at altitude, *Bulletin Geodesic*. 56: 95-105. 1982.
- Sjöberg L.E. Least-squares combination of satellite harmonics and integral formulas in physical geodesy, *Gerlands Beitr. Geophysik, Leipzig* 89(5):371-377. 1980.
- SJÖBERG L.E. Least-squares combination of terrestrial and satellite data in physical geodesy, *Annals of Geophysics.*, t. 37: 25-30. 1981.
- SJÖBERG L.E. and HUNEGNAW A. Some modifications of Stokes' formula that account for truncation and potential coefficient errors. *Journal of Geodesy*, 74, 232-238. 2000.
- SPRLAK M, NOVAK P Integral transformations of gradiometric data onto a GRACE type of observable. *Journal of Geodesy* 88:377–390. 2014a
- SPRLAK AND NOVAK. Integral transformations of deflections of the vertical onto satellite-to-satellite tracking and gradiometric data. *Journal of Geodesy* 88: 643-657. 2014b.

- SPRLAK M. GERLACH C. and PETTERSEN B. R. Validation of GOCE global gravity field models using terrestrial gravity data in Norway, *Journal of Geodesy and Geosciences*. 2(2):134-143. 2012.
- STOKES G.G. *On the variation of gravitation the surface of the Earth*. Transactions of the Cambridge Philosophical Society 8, 672–695. 1849.
- TAPLEY B., RIES J. BETTADPUR S., CHAMBERS D., CHENG M., CONDI F., GUNTER B., KANG Z., NAGEL P., PASTOR R., PEKKER T., POOLE S. and WANG F. GGM02-An improved Earth gravity field model from GRACE. *Journal of Geodesy*., 79:467-478. 2005.
- TOTH GY., ADAMJ., FOLDVARY L., TZIAVOSI.N., DENKER H. Calibration/validation of GOCE data by terrestrial torsion balance observations, *A Window on the Future of Geodesy International Association of Geodesy Symposia* Volume 128, 2005, pp 214-219. 2005
- TSCHERNING C.C. and RAPP R. Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations and deflections of vertical implied by anomaly degree variance models. *Rep. 355*. Dept. Geod. Sci. Ohio State University, Columbus, USA. 1974.
- TSCHERNING C. C., VEICHERTS M. and ARABELOS D. Calibration of GOCE gravity gradient data using smooth ground gravity, *In Proc. GOCINA workshop, Cahiers de center European de Geodynamique et de seismologie*, Vol. 25, pp. 63-67, Luxemburg. 2006.
- VANICEK P. and KLEUSBERG A. The Canadian geoid Stokesian approach. *Manuscripta Geodaetica* 12, 2, 86–98. 1987.
- VANICEK P. and SJÖBERG L.E. Reformulation of Stokes's theory for higher than second-degree reference field and modification of integration kernels. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth* 96 (B4), 6529–6539. 1991.
- WANGER C.A. and MCADOO D. C. Error calibration of geopotential harmonics of recent and past gravitational fields, *Journal of Geodesy*. 86: 99-108. 2012.
- WENZEL H.G. (1981) Zur Geoidbestimmung durch kombination von schwereanomalien und einem kugelfuncationsmodell mit hilfe von integralformeln. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 106, 3, 102-111. 1981.
- WONG, L. and GORE, R. Accuracy of geoid heights from modified Stokes kernels. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*18, 81–91, 1969.
- WOLF K. I. *Kombination globaler Potentialmodelle mit terrestrischen Schwereanomalien für die Berechnung der zweiten Ableitungen des Gravitationspotentials in Satellitenbahnhöhe*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover 264, University of Hannover, Hannover, Germany. 2007.
- ZIELINSKI, J.B., PETROVSKAYA, M.S. The possibility of the calibration/validation of the GOCE data with the balloon-borne gradiometer. *Advanced Geosciences*. 1, 149–153.. 2003.

(Recebido em setembro de 2014. Aceito em dezembro de 2014).

APPENDIX

Table 3 - Statistics of errors of generated SGG data at different ψ_0 using modified estimators to $L = 150$ and $5' \times 5'$ gravity anomalies at sea level. Unit: 1 mE.

		$\psi_0 = 2^\circ$				$\psi_0 = 2.5^\circ$				$\psi_0 = 3^\circ$			
		Min	Mean	Max	Std	Min	Mean	Max	Std	Min	Mean	Max	Std
T_{zz}	Meissl	-4.65	-0.03	3.88	1.18	-2.73	-0.01	2.49	0.93	-1.51	0.01	1.59	0.64
	WG	-2.58	0.02	3.03	1.09	-3.36	0.01	3.13	1.31	-4.39	0.02	4.34	1.72
	HG	-3.83	-0.12	4.60	1.42	-3.69	-0.08	3.69	1.44	-4.65	-0.10	5.67	1.92
	MOL	-4.17	-0.04	4.79	1.52	-3.05	0.00	2.90	0.89	-2.73	0.03	2.82	0.81
	VK	-2.31	0.02	2.03	0.77	-2.54	-0.01	2.13	0.70	-1.93	0.01	1.91	0.74
T_{xz}	FEO	-4.11	-0.16	3.58	1.37	-3.63	-0.16	2.84	1.24	-2.86	-0.11	3.00	1.09
	Meissl	-6.74	0.03	5.28	1.82	-6.79	0.05	5.20	1.90	-5.47	0.04	4.55	1.87
	WG	-2.51	0.02	3.43	1.21	-2.38	0.02	3.29	1.15	-2.18	0.02	3.20	1.08
	HG	-2.44	0.02	2.91	1.14	-2.51	0.02	3.55	1.21	-2.48	0.02	3.59	1.17
	MOL	-0.89	0.11	0.74	0.30	-1.17	0.17	1.23	0.35	-1.44	0.23	1.61	0.46
T_{yz}	VK	-1.17	-0.01	1.14	0.49	-1.25	-0.02	1.39	0.47	-1.35	-0.02	1.50	0.47
	FEO	-2.50	-0.01	1.81	0.82	-1.63	-0.02	1.59	0.63	-2.11	-0.02	1.82	0.76
	Meissl	-5.71	-0.02	5.44	1.61	-5.83	-0.03	5.99	1.74	-5.01	-0.04	4.73	1.62
	WG	-2.52	-0.01	2.57	0.93	-2.38	-0.01	2.42	0.88	-2.21	0.00	2.36	0.81
	HG	-2.32	-0.02	2.56	0.87	-2.48	0.00	2.43	0.92	-2.36	0.01	2.38	0.88
$T_{xx} - T_{yy}$	MOL	-1.91	0.01	1.54	0.68	-3.19	0.02	2.30	1.10	-5.28	0.04	3.05	1.59
	VK	-0.71	0.02	0.89	0.30	-0.71	0.03	0.99	0.32	-0.81	0.03	1.14	0.35
	FEO	-1.43	-0.01	1.19	0.58	-1.32	0.00	1.23	0.49	-1.64	0.00	1.53	0.61
	Meissl	-4.23	0.00	4.64	1.42	-3.98	-0.02	4.03	1.41	-3.42	-0.02	3.32	1.20
	WG	-4.92	-0.10	4.67	1.55	-5.43	-0.11	5.09	1.68	-5.50	-0.11	5.18	1.70
T_{xy}	HG	-5.69	-0.06	6.74	2.01	-5.88	-0.09	6.34	1.94	-6.15	-0.08	6.89	2.07
	MOL	-14.3	0.85	20.4	7.48	-23.2	1.77	33.6	12.6	-37.4	2.91	47.02	18.59
	VK	-6.25	-0.14	5.95	2.00	-6.35	-0.15	6.14	2.09	-6.30	-0.15	6.11	2.11
	FEO	-5.92	-0.16	5.03	1.85	-6.20	-0.16	5.77	2.03	-6.25	-0.15	5.98	2.09
	Meissl	-3.33	0.00	2.32	0.77	-2.88	0.01	2.77	0.82	-2.40	0.01	2.53	0.75
T_{xy}	WG	-3.47	0.03	3.70	1.41	-3.71	0.03	4.08	1.53	-3.75	0.03	4.13	1.55
	HG	-4.45	0.04	4.24	1.68	-4.31	0.04	4.40	1.69	-4.57	0.04	4.57	1.77
	MOL	-9.18	0.16	10.39	3.96	-14.8	0.31	15.41	6.55	-21.6	0.55	20.83	9.80
	VK	-4.36	0.03	4.83	1.89	-4.53	0.03	4.97	2.04	-4.57	0.03	5.00	2.09
	FEO	-3.92	0.02	4.62	1.78	-4.35	0.03	4.89	2.00	-4.51	0.03	4.97	2.07

Table 4 - Statistics of errors of generated gradients from $5' \times 5'$ gravity anomalies at different ψ_0 and $L = 75$. Unit: 1 mE.

		$\psi_0 = 2^\circ$				$\psi_0 = 2.5^\circ$				$\psi_0 = 3^\circ$			
		Min	Mean	Max	Std	Min	Mean	Max	Std	Min	Mean	Max	Std
T_{zz}	Meissl	-21.1	0.1	15.4	8.0	-20.7	-0.4	22.2	9.3	-21.7	-0.4	20.5	9.5
	WG	-50.5	3.6	49.7	24.6	-41.3	2.9	39.0	18.8	-31.6	2.3	32.4	14.4
	HG	-62.9	4.1	71.1	33.3	-50.9	3.2	58.9	25.8	-33.2	2.4	39.1	17.3
	MOL	-11.9	0.4	19.6	5.5	-11.3	0.0	18.8	5.5	-13.3	-0.1	19.1	5.7
T_{xz}	VK	-21.1	0.8	15.0	8.4	-20.4	0.3	11.7	7.8	-20.0	0.0	16.0	8.1
	FEO	-21.2	0.7	14.1	8.3	-20.8	0.3	14.6	7.9	-21.3	0.1	15.2	8.2
	Meissl	-22.2	2.5	27.6	10.4	-11.6	1.3	14.1	5.4	-13.5	0.1	10.3	5.0
	WG	-20.4	1.9	12.7	6.4	-21.1	2.0	13.1	6.5	-17.8	2.1	13.8	6.3
T_{yz}	HG	-21.3	1.9	14.7	7.1	-19.6	1.9	12.4	6.5	-17.3	1.9	14.5	7.1
	MOL	-13.0	1.9	12.1	5.4	-6.9	1.3	7.2	3.1	-4.9	0.8	4.6	2.1
	VK	-12.6	1.2	9.8	4.5	-10.9	0.2	12.1	4.8	-13.7	-0.4	14.2	6.1
	FEO	-24.6	0.8	35.5	12.8	-22.7	-0.1	30.5	11.6	-18.9	-0.5	20.9	8.8
$T_{xx}-T_{yy}$	Meissl	-51.0	2.2	55.5	25.5	-30.4	1.4	36.6	14.9	-19.0	0.7	25.0	8.0
	WG	-31.5	1.7	33.1	16.9	-31.3	1.7	32.8	16.9	-27.2	1.6	28.4	15.3
	HG	-30.7	1.7	32.1	16.3	-34.2	1.7	35.3	18.3	-31.3	1.6	34.5	17.4
	MOL	-23.7	0.7	18.8	9.3	-18.9	0.1	12.2	5.3	-19.4	-0.1	9.0	4.8
T_{xy}	VK	-19.3	1.1	20.3	9.7	-11.8	0.6	14.3	5.6	-10.4	0.3	13.1	4.8
	FEO	-32.2	1.1	35.8	15.9	-22.6	0.6	21.9	10.3	-15.1	0.4	14.9	6.4
	Meissl	-53.1	5.0	63.4	27.4	-60.4	5.5	71.8	30.7	-74.0	6.4	86.8	37.0
	WG	-88.1	6.8	98.1	42.4	-97.4	7.6	110.1	47.0	-99.7	7.8	112.0	47.9
T_{yy}	HG	-133	9.5	155.2	63.6	-130	9.6	152.0	62.4	-113	8.7	130.0	54.5
	MOL	-73.7	7.1	101.5	41.1	-105	9.1	115.9	48.7	-136	11.1	134.3	56.0
	VK	-90.2	6.9	100.8	43.4	-105	8.2	119.9	50.8	-116	9.0	130.2	55.5
	FEO	-52.6	4.1	95.2	28.1	-77.7	6.3	104.1	38.5	-99.1	7.9	107.7	47.5
T_{zz}	Meissl	-21.6	-1.2	26.7	11.0	-23.7	-1.3	30.6	12.3	-28.4	-1.6	37.8	14.9
	WG	-31.8	-1.6	45.1	17.4	-35.2	-1.8	50.3	19.2	-36.1	-1.9	51.1	19.6
	HG	-43.2	-2.0	54.7	19.5	-41.8	-2.1	57.4	20.4	-37.1	-2.0	54.1	19.9
	MOL	-40.1	-0.2	48.5	19.5	-52.9	0.8	58.0	25.8	-65.6	2.2	63.9	32.7
T_{xy}	VK	-32.6	-1.6	46.3	17.8	-38.2	-2.0	54.5	20.8	-42.7	-2.3	59.1	22.7
	FEO	-31.5	-1.2	38.4	18.3	-36.1	-1.7	48.7	20.8	-41.4	-2.1	55.6	22.5

Table 5 - Statistics of errors of generated gradients for $\psi_0 = 3^\circ$ at different degrees of modification. Unit: 1 mE.

		L = 100				L = 125				L = 175			
		Min	Mean	Max	Std	Min	Mean	Max	Std	Min	Mean	Max	Std
T _{zz}	Meissl	-6.3	0.3	8.7	2.9	-5.3	0.1	4.8	1.9	-1.3	0.0	1.1	0.4
	WG	-12.1	0.7	19.8	7.6	-6.0	0.0	5.6	2.4	-1.6	0.0	1.8	0.6
	HG	-12.5	0.7	19.9	7.6	-6.1	0.0	5.4	2.4	-2.5	-0.1	2.4	0.8
	MOL	-9.8	0.0	12.2	3.7	-3.6	0.0	5.3	1.5	-1.8	0.0	1.8	0.5
	VK	-6.0	0.4	7.5	3.0	-4.7	0.1	4.7	1.8	-1.0	0.0	0.8	0.3
T _{xz}	FEO	-9.0	0.2	8.1	3.3	-5.9	0.1	5.4	2.1	-1.7	-0.1	1.3	0.5
	Meissl	-6.4	-0.1	8.7	3.3	-7.5	0.1	7.5	2.9	-1.7	0.0	2.0	0.7
	WG	-6.7	0.0	9.4	3.5	-4.1	0.1	4.5	1.8	-0.6	0.0	0.7	0.2
	HG	-6.1	-0.2	7.6	3.2	-4.9	0.1	4.5	2.0	-0.6	0.0	0.7	0.2
	MOL	-2.2	0.3	3.0	0.9	-1.9	0.3	2.0	0.6	-1.1	0.2	1.3	0.3
T _{yz}	VK	-4.5	0.0	5.2	1.8	-2.9	0.2	4.8	1.4	-0.6	0.0	0.7	0.3
	FEO	-4.8	0.1	5.5	1.9	-2.9	0.2	4.9	1.4	-1.1	0.0	1.2	0.4
	Meissl	-7.2	0.1	9.6	3.4	-8.2	-0.2	5.6	2.5	-1.8	0.0	2.2	0.8
	WG	-13.5	0.2	13.0	6.7	-3.9	-0.1	4.2	1.6	-0.7	0.0	0.7	0.2
	HG	-14.2	0.2	13.1	6.5	-4.3	-0.2	4.7	1.8	-0.6	0.0	0.7	0.2
T _{xx} -T _{yy}	MOL	-12.4	-0.1	6.1	3.2	-7.9	0.0	4.0	2.2	-3.3	0.1	2.4	1.1
	VK	-4.8	0.2	5.7	2.4	-3.6	-0.1	2.7	1.0	-1.0	0.0	1.1	0.3
	FEO	-4.7	0.1	5.6	2.5	-3.7	-0.1	2.6	1.0	-1.5	0.0	1.7	0.5
	Meissl	-24.0	0.2	23.4	11.1	-8.3	-0.3	8.4	3.2	-3.5	0.0	3.3	1.1
	WG	-31.2	0.0	30.4	13.1	-11.7	-0.4	11.1	4.8	-1.7	0.0	2.1	0.7
T _{yz}	HG	-31.1	0.0	30.1	13.0	-11.8	-0.4	11.3	4.9	-3.1	0.0	3.4	1.1
	MOL	-89.1	6.7	94.3	38.5	-56.8	4.4	64.2	26.4	-24.2	1.9	32.8	12.7
	VK	-36.2	0.2	34.4	16.0	-14.4	-0.4	13.4	5.7	-2.7	0.0	3.1	1.1
	FEO	-36.0	0.2	34.3	15.8	-14.5	-0.4	13.2	5.7	-2.6	0.0	3.0	1.1
	Meissl	-13.6	0.1	16.8	6.2	-5.3	0.0	4.7	2.0	-2.1	0.0	1.8	0.6
T _{yz}	WG	-16.1	0.2	23.2	7.6	-8.4	0.1	8.4	3.3	-0.9	0.0	1.0	0.4
	HG	-15.9	0.2	22.9	7.5	-8.6	0.1	8.7	3.4	-1.4	0.0	1.3	0.5
	MOL	-44.9	1.4	41.6	21.2	-30.3	0.9	29.5	14.2	-14.8	0.3	14.8	6.6
	VK	-19.5	0.2	26.8	9.2	-9.1	0.1	10.6	3.9	-1.2	0.0	1.2	0.5
	FEO	-19.2	0.2	26.2	9.0	-9.0	0.0	10.3	3.8	-1.2	0.0	1.2	0.5

Table 6 - Statistics of errors of generated gradients using the modified estimator with $\psi_0 = 2^\circ$ and 2.5° with $L = 100$ and 125 from $30' \times 30'$ gravity anomalies. Unit: 1 mE.
Mean (M).

		$\psi_0 = 2$								$\psi_0 = 2.5$							
		$L = 100$				$L = 125$				$L = 100$				$L = 125$			
		Min	M	Max	Std	Min	M	Max	Std	Min	M	Max	Std	Min	M	Max	Std
T_{xz}	Meissl	-7.6	0.3	9.1	3.2	-6.4	0.2	7.8	2.7	-8.1	0.2	8.9	2.5	-5.9	0.1	5.5	2.2
	WG	-19.7	0.8	26.8	9.3	-13.1	0.7	20.4	7.8	-6.4	0.0	5.9	2.5	-5.8	0.0	5.5	2.4
	HG	-26.0	0.4	26.4	10.6	-15.7	0.5	20.4	7.9	-7.7	0.0	7.4	2.9	-6.0	0.0	5.3	2.4
	MOL	-9.7	0.0	12.1	3.7	-11.3	-0.1	13.4	4.2	-6.0	-0.1	8.0	2.4	-5.5	-0.1	7.7	2.3
	VK	-7.4	0.5	10.9	4.0	-6.3	0.4	7.9	3.2	-5.5	0.1	5.7	1.6	-5.5	0.1	5.4	1.7
T_{yz}	FEO	-8.1	0.4	10.9	4.1	-8.2	0.3	8.1	3.4	-6.6	0.1	6.4	2.1	-6.6	0.1	6.3	2.2
	Meissl	-9.7	-0.1	15.6	4.7	-7.2	-0.1	9.9	3.2	-7.9	0.1	6.8	2.7	-8.2	0.2	6.7	2.6
	WG	-8.5	-0.1	12.3	4.3	-7.4	-0.1	10.6	4.0	-5.1	0.1	6.3	2.2	-4.2	0.1	4.6	1.9
	HG	-8.4	-0.4	9.1	3.5	-7.7	-0.4	8.8	3.5	-5.0	0.1	6.5	2.0	-4.2	0.1	4.8	1.8
	MOL	-4.6	0.2	6.5	1.9	-2.1	0.3	2.9	1.0	-1.6	0.2	2.0	0.7	-1.8	0.2	1.8	0.6
T_{yz}	VK	-5.5	0.0	6.0	2.4	-4.7	0.0	4.9	1.9	-2.7	0.2	4.2	1.3	-3.0	0.2	4.7	1.3
	FEO	-10.3	-0.7	11.1	4.7	-4.6	-0.2	4.8	2.2	-3.6	0.2	5.1	1.7	-3.1	0.2	4.9	1.3
	Meissl	-14.4	0.2	19.9	7.8	-8.2	0.1	12.1	4.5	-8.3	-0.2	6.1	2.3	-8.8	-0.1	6.0	2.4
	WG	-19.2	0.2	17.0	7.8	-16.6	0.2	15.2	7.5	-4.7	-0.2	5.0	2.0	-3.9	-0.1	4.3	1.6
	HG	-16.8	0.2	16.1	7.4	-16.6	0.3	14.5	7.1	-3.6	-0.2	3.8	1.6	-3.6	-0.1	3.9	1.4
$T_{xz-T_{yy}}$	MOL	-7.8	0.1	8.0	3.7	-9.7	0.0	5.7	2.9	-3.5	0.0	2.9	1.1	-4.9	0.0	3.4	1.6
	VK	-7.8	0.2	10.0	4.2	-5.3	0.2	6.9	2.9	-2.9	-0.1	2.5	0.9	-3.4	-0.1	2.7	1.0
	FEO	-11.0	0.3	13.5	4.4	-5.9	0.2	8.3	2.8	-3.2	-0.1	2.8	1.2	-3.5	-0.1	2.5	1.0
	Meissl	-16.1	0.1	15.6	7.5	-19.7	0.1	19.4	9.0	-6.4	-0.2	7.1	2.2	-6.7	-0.2	8.1	2.8
	WG	-29.8	0.0	28.4	12.6	-30.0	0.0	28.7	12.7	-10.7	-0.4	10.0	4.3	-11.0	-0.4	10.5	4.5
T_{xy}	HG	-32.0	0.1	31.5	14.1	-30.6	0.1	29.8	13.2	-10.9	-0.4	11.6	4.6	-11.0	-0.4	10.8	4.6
	MOL	-38.3	2.6	57.3	21.2	-62.6	4.6	76.1	30.0	-22.8	1.4	31.8	11.9	-36.7	2.8	49.0	19.9
	VK	-32.9	0.0	31.8	13.8	-35.6	0.1	34.4	15.3	-12.9	-0.4	12.3	5.3	-13.9	-0.4	13.1	5.6
	FEO	-32.1	-0.1	31.2	13.2	-35.2	0.1	33.0	14.9	-13.3	-0.4	12.9	5.2	-14.1	-0.4	12.8	5.6
	Meissl	-9.5	0.1	10.6	4.1	-11.1	0.1	13.4	5.0	-3.8	0.0	2.8	1.2	-4.3	0.0	3.9	1.6
T_{xy}	WG	-15.6	0.2	22.1	7.3	-15.7	0.2	22.3	7.4	-7.6	0.1	7.4	2.9	-8.1	0.1	7.6	3.1
	HG	-17.4	0.2	25.1	8.3	-16.3	0.2	23.3	7.7	-9.0	0.1	9.7	3.5	-8.3	0.1	8.0	3.2
	MOL	-25.1	0.4	27.7	10.7	-34.8	0.8	33.1	15.7	-12.9	0.3	15.2	6.1	-21.3	0.5	21.7	9.8
	VK	-17.1	0.2	24.2	8.0	-18.7	0.2	26.3	8.8	-8.9	0.1	9.3	3.6	-9.1	0.1	10.4	3.8
	FEO	-15.9	0.2	21.9	7.5	-18.0	0.2	25.0	8.5	-8.0	0.0	7.7	3.2	-8.7	0.0	9.6	3.6

SHORT STATIC GPS/GLONASS OBSERVATION PROCESSING IN THE CONTEXT OF ANTENNA PHASE CENTER VARIATION PROBLEM

Elaboração de curtas sessões estáticas de observação de GPS/GLONASS no contexto do problema de variação da posição de centro de fase da antena

KAROL DAWIDOWICZ
RAFAL KAZMIERCZAK
KRZYSZTOF SWIATEK

University of Warmia and Mazury in Olsztyn
Faculty of Geodesy and Land Management
Oczapowskiego 1, Olsztyn, Poland
karol.dawidowicz@uwm.edu.pl; rafal.kazmierczak@uwm.edu.pl;
krzysztof.swiatek@uwm.edu.pl

ABSTRACT

So far, three methods have been developed to determine GNSS antenna phase center variations (PCV). For this reason, and because of some problems in introducing absolute models, there are presently three models of PCV receiver antennas (relative, absolute converted and absolute) and two satellite antennas (standard and absolute). Additionally, when simultaneously processing observations from different positioning systems (e.g. GPS and GLONASS), we can expect a further complication resulting from the different structure of signals and differences in satellite constellations. This paper aims at studying the height differences in short static GPS/GLONASS observation processing when different calibration models are used. The analysis was done using 3 days of GNSS data, collected with three different receivers and antennas, divided by half hour observation sessions. The results show that switching between relative and absolute PCV models may have a visible effect on height determination, particularly in high accuracy applications. The problem is especially important when mixed GPS/GLONASS observations are processed. The update of receiver antenna calibrations model from relative to absolute in our study (using LEIAT504GG, JAV_GRANT-G3T and

TPSHIPER_PLUS antennas) induces a jump (depending on the measurement session) in the vertical component within to 1.3 cm (GPS-only solutions) or within 1.9 cm (GPS/GLONASS solutions).

Keywords: PCV; GPS; GLONASS; ANTEX.

RESUMO

Até agora foram elaborados três métodos de modelagem a variação (de posição) do centro de fase das antenas GNSS (PCV). Por isso e tendo em conta alguns problemas relacionados com a implementação dos modelos absolutos, neste momento podem ser citados três modelos PCV para as antenas dos receptores (relativos, absolutos convertidos e absolutos) e dois modelos para as antenas de satélites (padrão e absolutos). Ademais, analisando ao mesmo tempo as observações de vários sistemas de posicionamento, por exemplo, GPS e GLONASS, podem ser esperadas mais complicações resultantes da estrutura diferenciada dos sinais e diferenças na constelação dos satélites. O objetivo do presente trabalho foi a análise das diferenças da altura, obtidas com base na elaboração de sessões estáticas curtas de medições GPS/GLONASS, resultantes de aplicação de vários modelos de calibração das antenas. A análise foi feita com base em três dias de observações de GNSS, realizadas com três modelos diferentes de receptores e antenas, divididas em sessões de observação de meia hora. Os resultados mostram que a alteração dos modelos relativos de PCV em absolutos pode influenciar significativamente a determinação de altura, particularmente no caso quando os trabalhos exigem alta precisão. O problema é particularmente visível na elaboração conjunta de observação GPS/GLONASS. Nos estudos realizados, a atualização do modelo de calibração da antena do receptor (usando antenas LEIAT504GG, JAV_GRANT-G3T i TPSHIPER_PLUS), do relativo para o absoluto, causou picos verticais da componente, conforme a sessão de medição, até 1,3 cm (para a solução GPS) ou até 1,9 cm (para a solução GPS / GLONASS).

Palavras-chave: PCV; GPS; GLONASS; ANTEX.

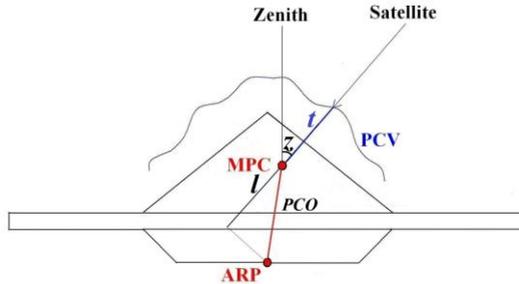
1. INTRODUCTION

The electrical antenna phase center is the point in space where the GNSS signal is received. However, that point varies depending on the frequency and the direction of the incoming signal, i.e. the elevation angle and azimuth to the satellite. The azimuth is the horizontal angle from true north to the satellite in a clockwise direction. Elevation is the pointing angle from the horizon to the satellite.

To solve the problem, some antenna points must be defined (Figure 1). The first of them is the mean position of the electrical antenna phase center (MPC). Each frequency has a different MPC offset. Next, the antenna reference point (ARP) is defined by the IGS as the intersection of antenna's vertical axis of symmetry with the bottom of the antenna. In turn, the antenna phase center offset (PCO) is a 3d displacement vector between the average frequency-dependent phase center and the

antenna reference point. Finally, the antenna phase center variations (PCV) is the deviation between the positions of the electrical antenna phase center of an individual measurement and the mean electrical antenna phase center.

Figure 1 - GNSS antenna ARP, MPC and PCV point locations.



A review of the antenna phase center variations problem can be found, for example, in Braun *et al.* (1993), Dawidowicz (2011, 2013), Geiger (1998), Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008), Krueger *et al.* (2009), Huinca *et al.* (2012, 2013), Menge *et al.* (1998), Menge (2003), Montenbruck *et al.* (2009), Rocken (1992), Schmid *et al.* (2005), Schmitz *et al.* (2002), Schupler and Clark (2001), Wanninger (2000, 2009), Völksen (2006).

Spatial relations between ARP, MPC and PCV points are determined by the calibration process and antenna phase center corrections models can then be created and expressed by (DACH *et al.*, 2007):

$$PCC(a,z) = t(a, z) + PCOe \quad (1)$$

where:

PCC(a, z) - the total phase center corrections in direction a (azimuth) and z (zenith angle);

PCO - the position of the MPC with respect to the mechanically defined ARP;

e - the unit vector in the direction from the receiver ARP to satellite;

t(a, z)- the spherical harmonic function of the phase center variations.

This process involves collecting and processing several hours of GNSS data, and it involves several assumptions about antenna characteristics.

Accurate and consistent modeling of the antenna phase centers continues to be one of the most vexing problems in GNSS analysis. Actually, three main methods have been distinguished to determine GNSS antenna phase center variations:

- relative field calibrations;
- anechoic chamber measurements;

-absolute field calibrations.

In relative field calibration, the PCV of one antenna is determined relative to another, reference antenna. For this reason, only the differences in the phase center behavior between the two antennas may be computed. (MADER, 1999; ROTHACHER and MADER, 1996). The results for the PCV of the tested antenna are relative to a reference antenna. As per definition, the PCV of this reference antenna are set to zero and the offsets are fixed. The typical reference antenna for the relative field calibration is the AOAD/M_T choke ring antenna. Their average L1 and L2 phase center offsets are defined as 11.0cm and 12.8cm respectively. Because of the influence of site multipath and the insufficient covering of the antenna hemisphere with observations, no azimuth dependence is estimated in these PCV solutions and corrections have a minimum elevation mask of 10 degrees.

In anechoic chamber measurements, an absolute antenna PCV is obtained. The method is based on analyzing how the location of the phase center of an artificial GNSS signal is changed when the antenna, put into an anechoic chamber, is rotated and tilted. (GÖRRES et al., 2006; ROTHACHER, 2001; ZEIMETZ and KUHLMAN, 2008). The main idea is to simulate the different signal directions by rotations of the GPS antenna. The calibration device consists of a fixed transmitter on one end and a remote-controlled positioner carrying the test antenna on the other end of the test chamber. To avoid multipath effects, the calibration measurements are made in anechoic chambers. The positioner rotates the test antenna by small amounts of elevation and azimuth. In this way, it is possible to simulate the different GPS-satellite directions. During calibration, a network analyzer measures the phase shift between the outgoing and incoming signals at each of the simulated satellite positions.

The absolute field calibration method used a perfectly calibrated robot on which the test antenna was located. The robot rotates and tilts the test antenna in different axes and, as a result, the PCO and PCV are estimated. (FALKO et al., 1998; ROTHACHER, 2001; SCHMID et al., 2005; WÜBBENA et al. 2000). There are two major problems for absolute phase center calibration in a field procedure. First of all, there is the necessity to eliminate the phase center variations of the reference antenna – the calibration is performed in a differential mode. Secondly, multipath errors must be separated from the phase center variations. Multipath signals are known to repeat at the same location every mean sidereal day. Formation of the sidereal time difference clearly eliminates multipath, but also the phase center variations. To obtain information on the antenna phase center variation, a change in the antenna orientation at one day is required. Changes in the setup of one antenna create phase differences. These differences are independent from the antenna used at the reference site of the baseline and can therefore be used to model phase center variations. Because relative observables are used, only the topology of the pattern can be described. Although the absolute size is not known, the term absolute antenna calibration is still valid for the approach, because the phase center variations are determined independently from a reference antenna.

Initially, relative antenna phase center models were used. Later, in 2006, the International GNSS Service (IGS) changed to absolute antenna phase center models. Because there are not yet results of absolute calibrations for all antenna types, absolute models are created for these antennas through the conversion from relative models. Thus, at present we can speak of three models of receiver antennas and two GNSS satellites. For receiver antennas, we have:

- the relative IGS antenna phase center correction model (from relative field calibration),
- the absolute IGS antenna phase center correction model (converted from relative - all the relative antenna offsets and phase center variations have been added to the absolute values for AOAD/M_T antenna),
- the absolute IGS antenna phase center correction model (from absolute field calibration).

For GNSS satellites, there are:

- the standard IGS antenna offset model,
- the absolute antenna phase center correction model.

The many possible available models may introduce some perturbation. Additionally, simultaneously processing observations from different positioning systems, e.g. GPS and GLONASS, we can expect a further complications resulting from the different structure of signals and differences in satellite constellations. As is well known, each GLONASS satellite completes an orbit in approximately 11 hours, 15 minutes, while a GPS satellite completes an orbit in approximately 11 hours, 58 minutes. Another potential difficulty is the fact that different GLONASS satellites transmit signals on different frequencies and, as we know, PCV depend on signal frequency. A review of the GPS/GLONASS observation processing problem can be found, e.g. in Bruyninx (2007), Dodson et al. (1999), Solfa Pinto et al. (2013), Wanninger and Wallstab-Freitag (2007), Weber et al. (2005). In the author's opinion, however, there is an obvious lack of similar studies connected to the PCV problem.

GLONASS satellites transmit signals using Frequency Division Multiple Access (FDMA) and have 12 allocated radio frequency carriers available in the L1 frequency band and 12 carriers in the L2 band. Each satellite transmits signals at two frequencies, using one assigned radio frequency carrier in the L1 frequency band and one assigned carrier in the L2 frequency band (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

The GLONASS PCV calibration differs compared to GPS because of the different frequencies of individual GLONASS satellites. For a long time the satellite constellation was not sufficient to perform a PCV calibration. In the beginning of the absolute field calibration, the robot optimized for GLONASS was stopped after three complete days without sufficient coverage of the antenna hemisphere. However, with the current constellation, several calibrations for different GNSS antenna types have been executed. The absolute robot calibration

estimated PCV from the mixture of observed GLONASS frequencies. Therefore, the calibration is satellite constellation-dependent and is not expected to be as accurate as for the GPS (WÜBBENA et al., 2006).

An alternative PCV modeling has been developed, which allows frequency dependent GLONASS PCV in terms of the individual frequency of the satellites determined. The fundamental assumption of the model is the linearity of PCV changes for GPS/GLONASS and GLONASS/GLONASS frequencies (SCHUPLER and CLARK, 2001). Eventually, it will be common to use GPS PCV for the correction of GLONASS PCV with a lack of better information. However, several issues related to GLONASS PCV are still pressing and important to investigate.

The aim of this paper is to study the height differences in short static GPS/GLONASS observation processing when different calibration models are used. The analysis was done using 3 days of GNSS data, collected with three different receivers and antennas, divided by half-hour observation sessions. In such short sessions, height changes can be visualized as a result of changes in the satellite's constellation above the point of measurement. Additionally, when simultaneously processing observations from GPS and GLONASS systems, some complications may arise from the different structure of signals, differences in satellite constellations and problems in GLONASS PCV modeling.

Because studies have shown that the impact of switching from standard IGS antenna offsets to absolute phase center corrections, for the antennas of satellites in a local network (for baselines < 80 km), for height determinations less than ± 0.5 mm (CHATAZINIKOAS et al., 2005), the following analysis focuses only on the problem of PCV receiver antennas.

2. METHODOLOGY OF STUDIES

This paper analyses the height differences in GNSS observation processing as a result of switching from relative to absolute receiver antenna calibration models. Both the relative and absolute calibrations models are available on the NGS website (<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>). All investigations were intended to evaluate the impact on height determination from the end user's point of view: the software, the correction models and processing parameters were the same as any other person would have used.

Topcon Tools v. 6.11 software was chosen for post-processing. In the software it is possible to introduce (define) PCV model by editing the antenna.xml file.

This software is an example of a so-called "commercial" software and its main advantage is its simplicity of operation – it only requires the operator to know the principles of GPS observations processing. On the other hand, most of the processing options (e.g. processing frequency, troposphere model or ambiguity resolution strategy) are beyond the possibilities of selection. In Topcon Tools, automatic selection of processing frequency is as follows:

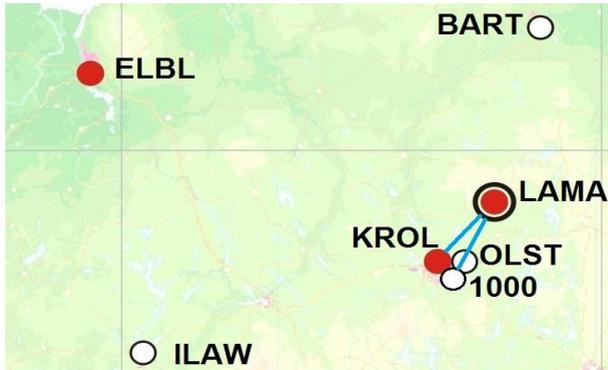
- 0-10 km baselines processing is L1 and L2,
- 10-30 km baselines processing is ionosphere-free combination,

- 30-400 km baselines processing is wide-lane combination.

It is well-known that over very short baselines, higher precision results are obtained using single frequency (L1) differential GPS data than with dual frequency data. This has two reasons. First, ionospheric effects at the two ends of a short baseline are very similar and cancel in differential processing. Second, observational noise of the L3 linear combination is larger by a factor of ~ 3 than for L1 observations only and also L3 combinations considerably amplify systematic effects due to multipath, antenna phase center offsets and variations, etc. Generally, single-frequency observations (L1) are used for processing baselines not longer than 10-15 km, where the ionospheric delays cancel out during differencing of the observations. The lower cost L1 GPS receivers can provide more precise surveying than more expensive dual frequency receivers over baselines up to 30 km in length (ROCKEN *et al.*, 2000). However, this approach requires the ionospheric delay to be modeled with a high level of precision. Single frequency receivers using such a model can provide better GPS surveying results than dual frequency receivers, even during solar maximum conditions. Generally, when processing longer than 10-15 km baselines, the ionosphere model should be taken into account in order to reduce the residual delays.

Because we want to use linear combination in observation processing, which causes antenna phase center variations of both frequencies to appear in the final results, suitable point locations had to be selected. We chose the point locations so that the average length of the baselines was about 20 km (Figure 2).

Figure 2 - Location of the test area and nearest ASG-EUPOS stations.



For the analysis, two ASG-EUPOS network stations (LAMA and KROL) and a point 1000 marked in Olsztyn (Table 1) were selected. ASG-EUPOS is a Polish GNSS Ground Based Augmentation System. The name ASG-EUPOS stands for Active Geodetic Network European Position Determination System. Actually, (06.2014) ASG-EUPOS consists of 100 stations located in Poland and 22 foreign stations.

Table 1. Hardware on points selected for testing.

Point name	LAMA	KROL	1000
Antenna type	LEIAT504GG LEIS	JAV_GRANT-G3T JAVAC	TPSHIPER_PLUS
Point localization			
Receiver type	Leica GRX1200GG+GNS S	JAVAD TRE_G3TH SIGMA	HIPER PRO

Analyses were based on three-day 24-hour observation sessions carried out from 20-23.11.2012.

The PDOP coefficient can be seen in the diagram below (Figure 3). The worst situation, as expected, occurred at point 1000, where in some periods the coefficient reaches 5. The PDOP values clearly improve by adding GLONASS observations. In the worst cases, the coefficient does not exceed 4. It should be mentioned that a PDOP value equal to 6 represents a level that marks the minimum appropriate for making surveys and, generally, in such cases GNSS measurements could be used for reliable positioning.

Figure 3 - The PDOP coefficient: a) GPS-only variant, b) GPS+GLONASS variant.

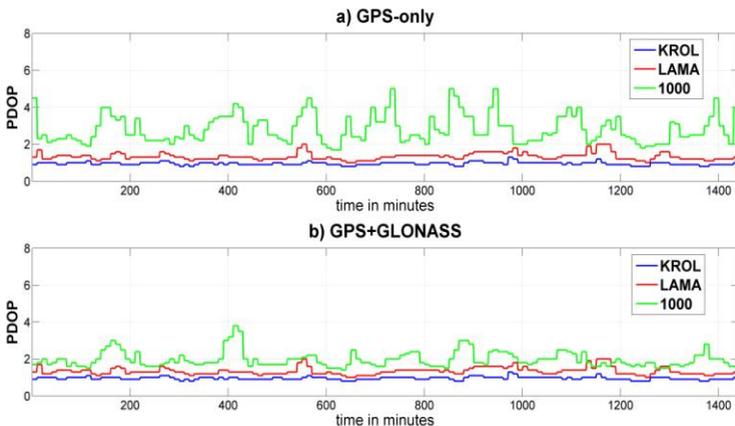
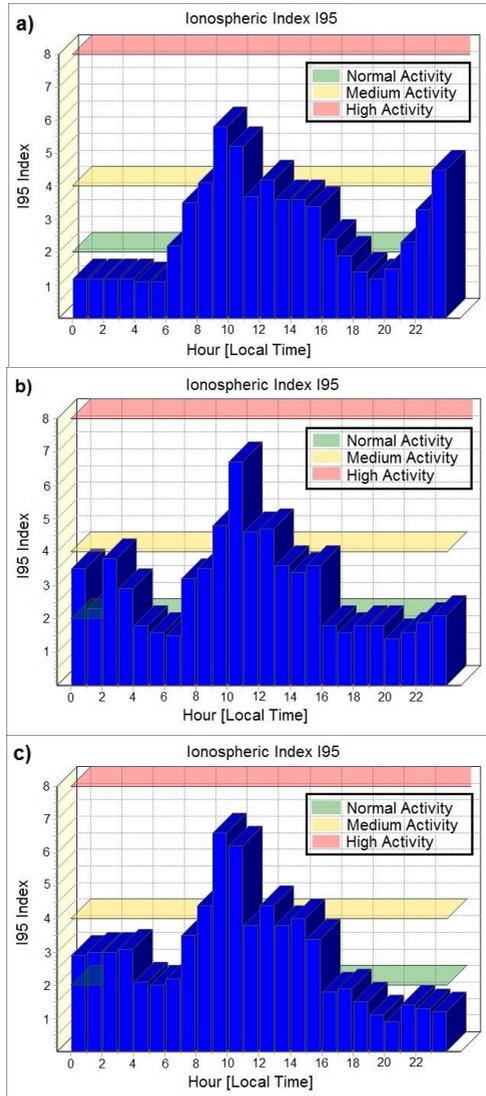


Figure 4 presents the Ionospheric Noise I95 Index for each day of measurement.

Figure 4 - The Ionospheric Noise I95 Index: a) 20.11.2012, b) 21.11.2012, c) 22.11.2012.



Source: <http://www.asgeupos.pl>

The Index 95 values reflect the intensity of ionospheric activity, i.e., the expected influences onto the relative GPS positions. The I95 values are computed from the ionospheric corrections for all satellites at all network stations for the respective hour. The worst 5% of data are rejected.

The following GNSS parameters were assumed for measurements: sampling interval 1s, minimum satellite elevation 10°. 24-hour observations were divided into half-hour sessions and processed in a single-baseline mode using Topcon Tools software in two main strategies:

- using the relative IGS models,
- using absolute IGS models.

In each strategy, GPS only and GPS/GLONASS observations were processed. Point locations were chosen so that observations were processed using the so-called “ionosphere-free linear combination” - L3 (double-frequency observation variant). Using the L3 combination in processing causes the differences in antenna PCV of both frequencies to appear in the final results. Other processing options (tropospheric model, orbits, satellite antenna calibrations, etc.) were identical in all runs.

As is well-known, the main error source in absolute and relative determination of antenna phase center variations is a multipath (WÜBBENA et al. 1996). An environment which is completely unaffected by multipath does not exist. Hence, the antenna phase pattern derived from field procedures is disturbed by a multipath and may create incorrect phase center variations.

The multipath signals are known to repeat at specific sites every mean sidereal day, i.e. every day the same systematics repeat themselves some minutes earlier. This fact has been used in antenna absolute field calibration procedure to greatly reduce the influence of multipath on the determination of phase center variations (WÜBBENA et al. 1996).

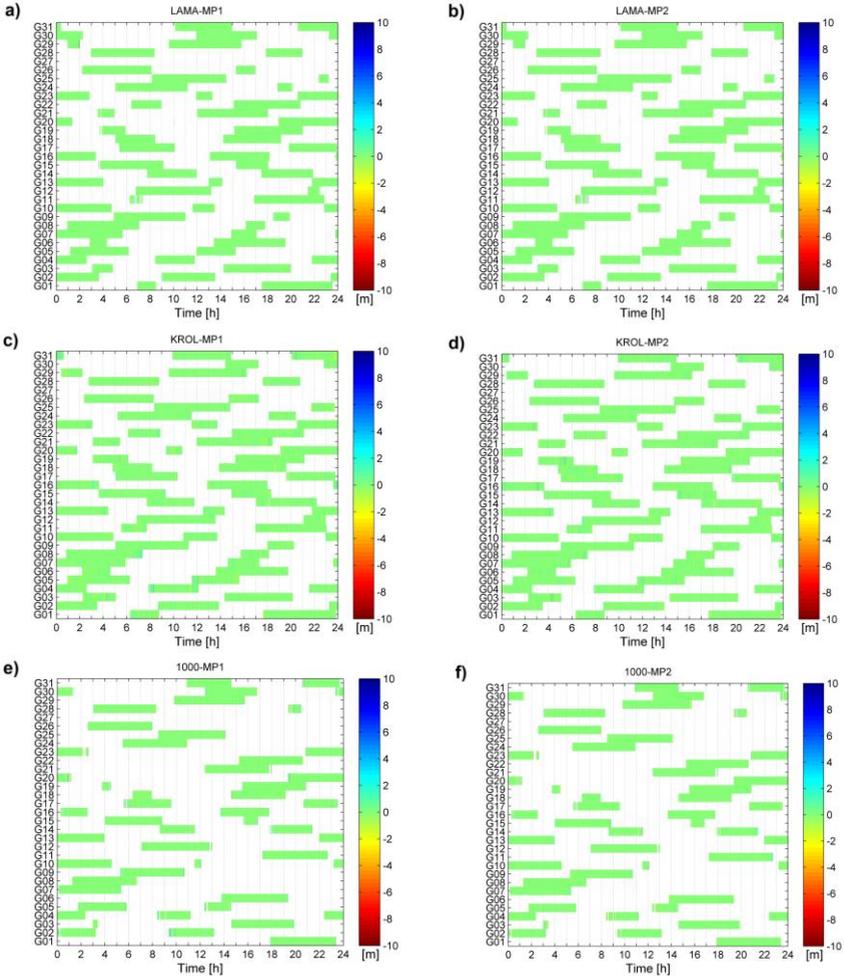
Because knowledge of the multipath at a particular site is important for a number of reasons we present below (Figure 5), colorized maps of high-frequency multipath created on the basis of TEQC report files of single-epoch data.

Figure 5 shows the range of GPS signal multipath errors that can be found on points selected for testing. All signals show minor or no multipath errors. The network station 1000 is, as expected, a slightly more affected station. This agrees very well with the existing obstructions (Table 2) on point 1000.

As expected, the multipath effects are highly correlated with the horizon masks. Generally, only for GPS signals arriving from a low elevation (the appearance and disappearance of satellites) the multipath effects are slightly larger. This can be seen clearly in the multipath detection map (Figure 5).

In our analysis, the results of processing the same observations in two variants (using absolute and relative field calibration models) were compared. Because the multipath affected the same observations in the same way, it can be assumed that its influence is greatly reduced when height differences are created.

Figure 5 - The range of GPS signals multipath on points selected for testing: a, b) LAMA; c, d) KROL; e, f) 1000.



The selected measurement antennas are characterized by differences between their phase characteristics and the changes in these characteristics for subsequent types of calibration. A comparison of the antenna phase characteristics on the measured baselines is shown in figures 6-8. The locations of MPC over ARP (“up” offset) for L1 and L2 frequencies for these antennas obtained from chosen calibration methods are presented in Table 2.

Figures 6, 7 and 8 present a comparison of the relative and absolute elevation dependent phase center variations for antennas used in measurements. A

comparison was made in antenna pairs: an antenna on a fixed point and an antenna on an unknown point.

Figure 6 - IGS relative elevation dependent PCV: a) for antenna pair LEIAT504GG and JAV_GRANT-G3T; b) for antenna pair LEIAT504GG and TPSHIPER_PLUS.

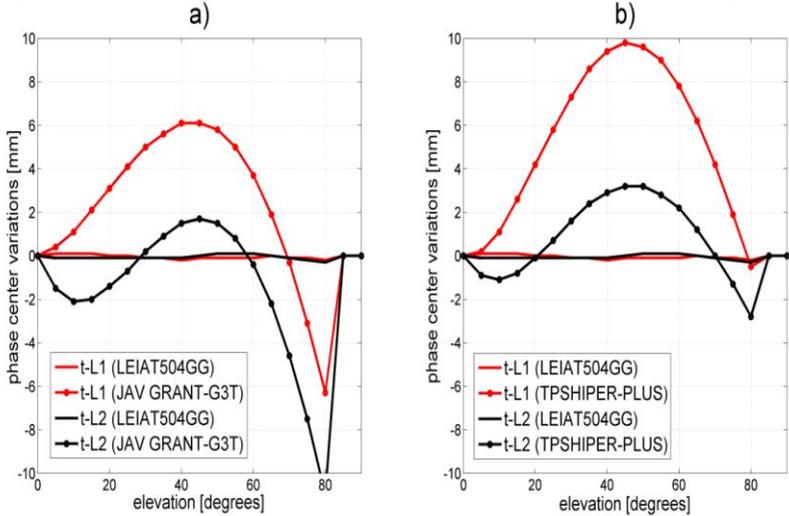


Figure 7 - IGS absolute elevation dependent PCV for GPS: a) for antenna pair LEIAT504GG and JAV_GRANT-G3T; b) for antenna pair LEIAT504GG and TPSHIPER_PLUS.

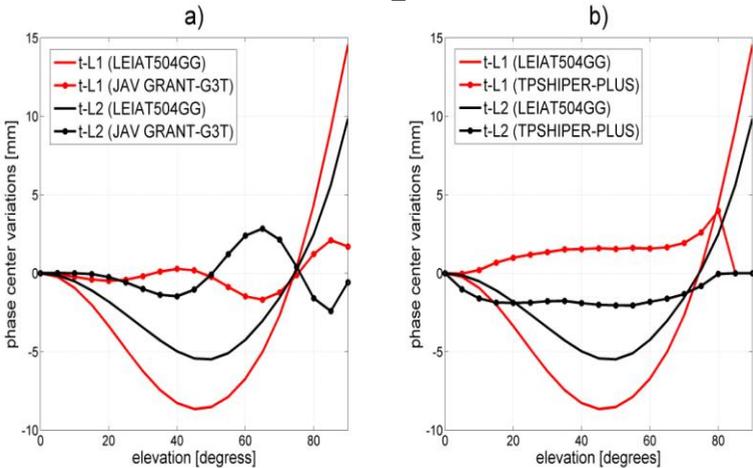


Figure 8 - IGS absolute elevation dependent PCV for GLONASS: a) for antenna pair LEIAT504GG and JAV_GRANT-G3T; b) for antenna pair LEIAT504GG and TPSHIPER_PLUS.

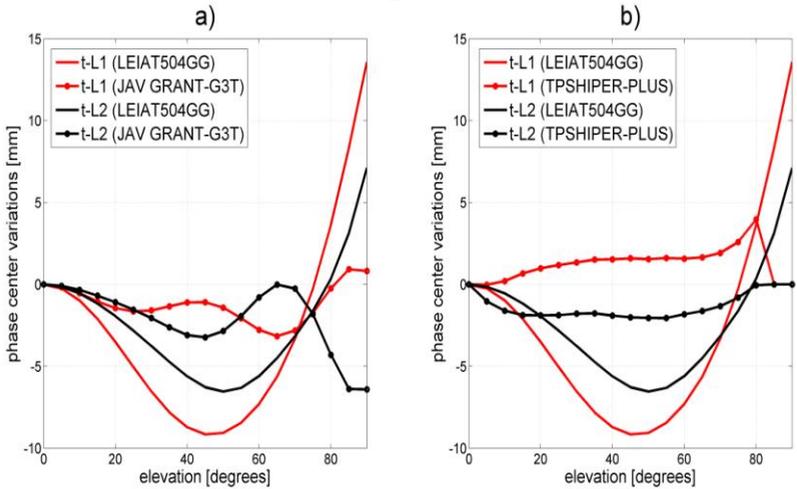


Table 2. The locations of MPC over ARP for antennas used in measurements (mm)

Calibration model	Locations of MPC over ARP					
	LEIAT504GG		JAV_GRANT-G3T		TPSHIPER_PLUS	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
Relative IGS	107.4	126.2	69.4	60.6	105.9	97.1
Absolute IGS	89.6	119.6	50.3	46.8	87.1	89.2

It is clear that the selected antennas have different profiles. Generally, the greatest difference was observed for medium zenith angles (from 30° to 60°), and for the L2 frequency, additionally, for large zenith angles (more than 70°). The maximum difference for the same frequency exceeded over 10 mm. These differences are also visible in comparing PCV characteristics for the same antenna, obtained from different calibration procedures – the maximum differences for the same frequency are up to 10 mm. Clear differences were also found between offsets obtained using the relative and absolute calibration methods. Comparing absolute elevation dependent PCV for GPS and GLONASS signals, there are only small 2-3 mm differences visible.

It should be noted that when we used the relative calibration model, GPS PCV were adopted for the correction of GLONASS PCV because of a lack of better information. Additionally, for TPSHIPER_PLUS antenna there are only absolute-

converted PCV model available (igs08.atx) without GLONASS PCV corrections. This was also the case in adopting GPS PCV corrections for GLONASS signals in post-processing. Figure 8 presents antenna GPS PCV corrections for TPSHIPER_PLUS.

3. RESULTS AND ANALYSIS

This paper presents the height differences obtained in short baseline GPS/GLONASS observation processing when different calibration models are used. The analysis was done using 3 days of GNSS data, collected with three different receivers and antennas, divided by half-hour observation sessions.

The baseline results obtained with the LEIAT504GG and JAV_GRANT G3T antennas (height differences for previously-mentioned processing strategies, on the JAV_GRANT-G3T antenna point) are presented in Table 3 and Figure 9. The figure shows the height differences obtained from the processing of GNSS observations using absolute and relative field calibration models (absolute – relative). Table 3 shows a summary of the height differences obtained for the baseline.

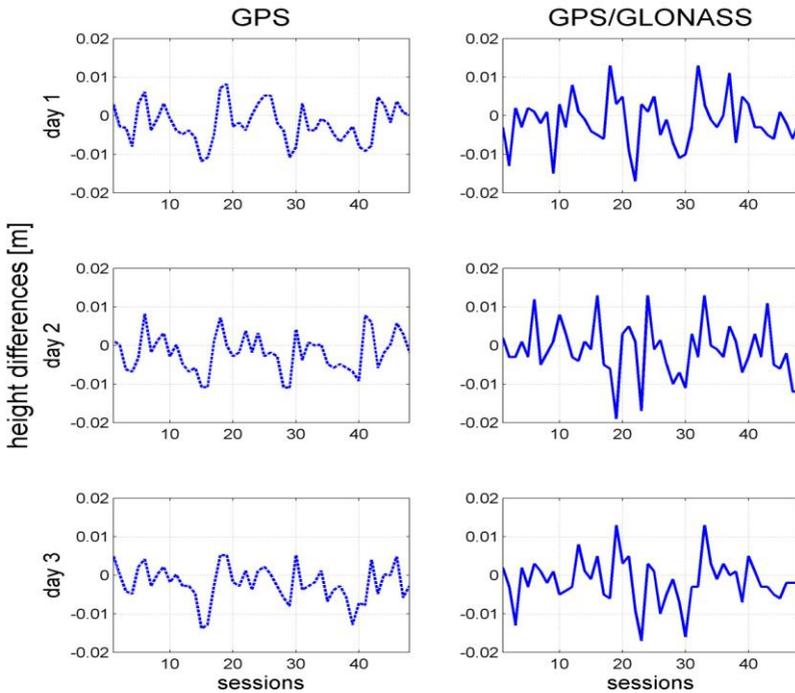
Table 3 - Summary of height differences obtained for points with the JAV_GRANT-G3T antenna (m).

Day of observations	Height differences for GPS solutions			Height differences for GPS/GLONASS solutions		
	Max.	Min.	Average	Max.	Min.	Average
Day 1	0.0052	-0.0118	-0.0032	0.0128	-0.0166	-0.0024
Day 2	0.0058	-0.0110	-0.0032	0.0141	-0.0172	-0.0039
Day 3	0.0052	-0.0128	-0.0029	0.0133	-0.0174	-0.0033

In analyzing the results obtained for the baseline with LEIAT504GG and JAV_GRANT G3T antennas, it can be seen that the height differences for the GPS-only solutions are within 1.3 cm. Significantly larger differences were obtained for processing done using GPS/GLONASS observations. In comparing the height differences obtained between the results using the absolute and relative calibrations models it is clear that for some solutions its size reaches 1.9 cm. Additionally, for GPS-only solutions there was a 12-hour repeatability of the results, although for GPS/GLONASS it is hard to find a similar behavior.

Comparing the minimum, maximum and average height differences for GPS-only and GPS/GLONASS solutions (Table 3), in the presented case it is clear that the effect of switching between calibration models for GPS/GLONASS results is stronger.

Figure 9 - The results of processing half hour sessions for baseline with LEIAT504GG and JAV_GRANT-G3T antennas.

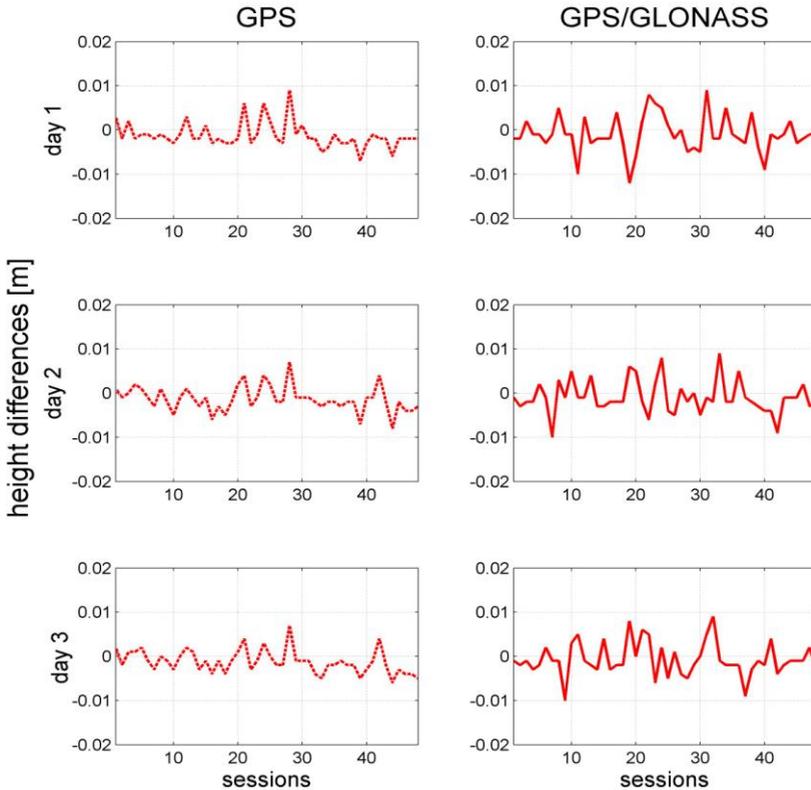


Similar results are presented below for LEIAT504GG and TPSHIPER_PLUS antennas. Figure 10 shows the height differences obtained from the processing of GNSS observations using absolute and relative field calibration models. Table 4 shows a summary of the height differences obtained for the baseline.

Table 4 - Summary of height differences obtained for points with the TPSHIPER_PLUS antenna.

Day of observations	Height differences for GPS solutions			Height differences for GPS/GLONASS solutions		
	Max.	Min.	Average	Max.	Min.	Average
Day 1	0.0068	-0.0071	-0.0013	0.0091	-0.0120	-0.0015
Day 2	0.0072	-0.0083	-0.0013	0.0088	-0.0099	-0.0017
Day 3	0.0087	-0.0069	-0.0014	0.0108	-0.0102	-0.0020

Figure 10 - The results of processing half hour sessions for baseline with LEIAT504GG and TPSHIPER_PLUS antennas.



For the baseline with LEIAT504GG and TPSHIPER_PLUS antennas, the height differences are visibly smaller. In analyzing the height differences for the GPS-only solutions, it is visible that they are within 1.0 cm. As previously, larger differences were obtained for processing done using GPS/GLONASS observations. The height differences are within 1.2 cm. Slightly less clear, but still visible, was a 12-hour repeatability of the results for GPS-only solutions. For GPS/GLONASS, it is hard to find a similar behavior. This may be due, among others, to differences in GPS and GLONASS satellite constellation repeatability (GLONASS satellites complete an orbit in approximately 11 hours, 15 minutes, while GPS satellites complete an orbit in approximately 11 hours, 58 minutes).

In comparing the minimum, maximum and average height differences for GPS-only and GPS/GLONASS solutions (Table 4) as before, switching between calibration models more strongly affected GPS/GLONASS results.

Generally, it can be concluded that GPS-only results are comparable to results obtained in other studies (DAWIDOWICZ, 2013; CHATZINIKIOS *et al.*, 2009; FALKO *et al.*, 1998; VÖLKSEN, 2006). There is a lack of similar studies on GPS/GLONASS observation processing. Both the large jump in the vertical component and the non-repeatability of GPS/GLONASS results, in the author's opinion, is worth further study.

Finally, it should be noted that the obtained height differences are the result of switching from the relative to the absolute PCV model for two pairs of antennas – for other antennas, the results may differ.

4. CONCLUSIONS

In this study, the height differences caused by switching between relative and absolute calibration models in GPS-only and GPS/GLONASS observation processing were compared. The advantage of the absolute approach is clear. Unfortunately, to date, not all antennas have absolute calibration models .

The update of receiver antenna calibrations from relative to absolute in our study (using LEIAT504GG, JAV_GRANT-G3T and TSHIPER_PLUS antennas) induces a jump (depending on the measurement session) in the vertical component within to 1.3 cm (GPS-only solutions) or within 1.9 cm (GPS/GLONASS solutions). These jumps are relevant for many high accuracy applications.

These jumps are mainly caused by changes in the satellite constellation above the measured points (directions of signals). However, some effects could also be caused by changes in measurement conditions, e.g. ionospheric and tropospheric delay.

Additionally, for GPS/GLONASS observation processing, two trends were noted. Height differences, obtained from the comparison results using absolute and relative antenna PCV models, are significantly larger for GPS/GLONASS solutions. Additionally, the non-repeatability of GPS/GLONASS results is clearly visible. This may result from differences in satellite constellations and the different structure of signals - GLONASS satellites transmit signals on different frequencies and, as we know, PCV depends on signal frequency.

In the author's opinion, these problems need further investigation.

REFERENCES

- BRUNINX, C. Comparing GPS-only with GPS+GLONASS positioning in a regional permanent GNSS network. *GPS Solutions*, v. 11(2), p. 97-106, 2007.
- BRAUN, J.; ROCKEN, C.; MEERTENS, C.M.; JOHANSON, J. GPS antenna mixing and phase center corrections. *Eos Trans. AGU, Fall Meeting Supplement*: 197, 1993.

- CHATAZINIKOS, M.; FOTIOU, A.; PIKRADIS, C. The effects of the receiver and satellite antenna phase center models on local and regional GPS networks. *Proceedings of the International Symposium: Modern technologies, educations and professional practice in geodesy and relative fields*, 5-6 November, Sofia, 2009.
- DACH, R.; HUGENTOLBER, U.; FRIDEZ, P.; MEINDL, M. Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern, p. 327-346, 2007.
- DAWIDOWICZ, K.; ŚWIĄTEK K. Some aspects of GPS observation elaboration for heights appointment requirements, *Proceedings of the 7th International Conference ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, Selected papers volume III: p. 1300-1304, 2008.
- DAWIDOWICZ, K. Comparison of using relative and absolute PCV corrections in short baseline GNSS observation processing. *Artificial Satellites*, v. 46, p. 19-31, 2011.
- DAWIDOWICZ, K. Impact of different GNSS antenna calibration models on height determination in the ASG-EUPOS network – a case study. *Survey Review*, v. 45(332), p. 386-394, 2013.
- DODSON, A.H.; MOORE, T.; BAKER, F.D.; SWANN, J.W. Hybrid GPS+GLONASS. *GPS Solutions*, v. 3(1), p. 32-41, 1999.
- FALKO, M.; SEEBER, G.; VÖLKSEN, CH.; WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 15-18 September, Nashville, TN; UNITED STATES, p. 31-38, 1998.
- GEIGER, A. Modeling of Phase Center Variation and its Influence on GPS Positioning. *Proceedings of the International GPS-Workshop Darmstadt: GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying*, 10-13 April 1998, Darmstad, v. 19, p. 210-222, 1998.
- GÖRRES, B.; CAMPBELL, M.; BECKER, M.; SIEMES, M. Absolute calibration of GPS antennas: Laboratory results and comparison with field and robot techniques, *GPS solutions*, v. 10, p. 136-145, 2006.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. *Springer-Verlag Wien, Austria*, 2008.
- HUINCA S.C.M.; KRUEGER, C.P.; MAYER, M.; KNÖPFLER, A.; HECK, B. First Results of Relative Field Calibration of a GPS Antenna at BCAL/UFPR (Baseline Calibration Stations for GNSS Antenna at UFPR/Brazil), *International Association of Geodesy Symposia 136 “Geodesy for Planet Earth”*, p. 739 – 744, 2012.
- HUINCA S.C.M.; KRUEGER, C.P.; HECK, B.; MAYER, M.; KNÖPFLER, A. BCAL/UFPR - The GNSS Antenna Calibration Service of Latin America. *International Association of Geodesy Scientific Assembly 2013*, 1-6 September, Potsdam, Deutschland, 2013.

- KRUEGER, C.P.; FREIBERGER, J.; HECK, B.; MAYER, M.; KNÖPFLER, A.; SCHÄFER B. Establishing a GNSS Receiver Antenna Calibration Field in the Framework of PROBRAL, *International Association of Geodesy Symposia "Observing our Changing Earth"*, p. 701- 707, 2009.
- MADER, G.L. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*, v. 13(1), p. 50-58, 1999.
- Magellan Corporation Ashtech Precision Products: Ashtech Solutions Tutorial. Printed in USA, 82 pages, 1999.
- Magellan Navigation Inc.: GNSS Solutions Reference Manual. Printed in USA. 472 pages, 2008.
- MENGE, F.; SEEBER, G.; VÖLKSEN, C. WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV. *In: Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS-98*, September 15-18, Nashville, Tennessee, 1998.
- MENGE, F. Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. *198 f. genehmigte Dissertation*. Hannover 2003.
- MONTENBRUCK, O.; GARCIA-FERNANDEZ, M.; YOKE, Y.; SCHÖN, S.; JÄGGI, A. Antenna Phase Center Calibration for Precise Positioning of LEO Satellites., *GPS Solutions*, v. 13 (1), p. 23-34, 2009.
- ROTHACHER, M. Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. *GPS Solutions*, v. 4, p. 55-60, 2001.
- ROTHACHER, M.; MADER, G. Combination of antenna phase center offsets and variation: antenna calibration set IGS_01. <http://ubecu.unibe.ch>, 1996.
- ROCKEN, C. GPS antenna mixing problems. *UNAVACO Memo*, 12 November, 1992.
- ROCKEN, C.; JOHNSON, JM.; BRAUN, JJ.; KAWAWA, H.; HATANAKA, Y.; IMAKIIE T. *Improving GPS surveying with modeled ionospheric corrections*. Geophysical Research Letters, v. 27 (23), p. 3821–3824, 2000.
- SCHMID, R.; ROTHACHER, M.; THALLER, D.; STEIGENBERGER, P. Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas. *GPS Solutions*, v. 9, p. 283-293, 2005.
- SCHMITZ, M.; WÜBBENA, G.; BOETTCHER, G. Tests of phase center variations of various GPS antennas, and some results. *GPS Solutions*, v. 6, p. 18-27, 2002.
- SCHUPLER, B.R.; CLARK, T.A. How Different Antennas Affect the GPS Observable. *GPS World*, November/December, p.32-36, 1991.
- SCHUPLER, B.R.; CLARK, T.A. Characterizing the Behavior of Geodetic GPS Antennas. *GPS World*, February, p. 48-55, 2001.
- SOLFA PINTO, M.; DE OLIVEIRA CAMARGO P.; GALERA MONICO J. F. Influence of combination of GPS and GLONASS data in georeferencing of rural properties, *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.19(1), p. 135-152, 2013.
- Topcon Positioning System: Topcon Tools User's Guide. Topcon Positioning Systems Inc, 455 pages, 2006.

- WANNINGER, L.; MAY, M. Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations *In: Proceedings of ION GPS2000*, Salte Lake City, UT, p. 132–144, 2000.
- WANNINGER, L.; WALLSTAB-FREITAG, S. Combined processing of GPS, GLONASS, and SBAS code phase and carrier phase measurements. *In: Proceedings of ION GNSS 2007*, p. 866–875, 2007.
- WANNINGER, L. Corrections of apparent position shifts caused by GNSS antenna changes, *GPS Solutions*, v. 13(2), p. 133 – 139, 2009.
- WEBER, R.; SLATER, J.A., FRAGNER, E., GLOTOV, V.; HABRICH, H.; ROMERO, I.; SCHAER, S. Precise GLONASS Orbit Determination within the IGS/IGLOS Pilot Project. *Advances in Space Research*, v. 36, p. 369-375, 2005.
- VÖLKSEN, CH. The Impact of different GPS Antenna Calibration Models on the EUREF Permanent Network. *Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF)*, Frankfurt/Main, p. 73-78, 2006.
- WÜBBENA, G.; MENGE, F.; SCHMITZ, M.; SEEGER, G.; VOLKSEN CH. A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*, September 17 - 20, 1996.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; MENGE, F.; BÖDER, V.; SEEGER G. Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time, *In: Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2000*, September 19-22, Salt Lake City, Utah, 2000.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BOETTCHER, G.; SCHUMANN, CH. Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern. *Submitted to the Proceedings of the IGS Workshop: Perspectives and Visions for 2010 and beyond*, 8-12 May 2006, Darmstadt, Germany, 2006.
- ZEIMETZ, P.; KUHLMAN, H. On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber. *FIG Working Week 2008*, 14-19 June 2008, Stockholm, Sweden, 2008.

(Recebido em julho de 2014. Aceito em outubro de 2014).

Boletim de Ciências Geodésicas

(ISSN: 1982-2170)

Revista do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas –UFPR

Normas para SUBMISSÃO

I – PROPOSTA EDITORIAL

O Boletim de Ciências Geodésicas destina-se à publicação de trabalhos inéditos tais como: Artigos, Comunicações Técnicas e Resumos de Teses e Dissertações das áreas das Ciências Geodésicas e afins (Geodésia, Fotogrametria, Sensoriamento Remoto, Cartografia, Sistemas de Informações Geográficas entre outras). Os Editores têm a prerrogativa de aceitar ou não trabalhos submetidos para publicação no que diz respeito à adequação à linha editorial do Boletim. A submissão dos trabalhos é na forma de fluxo contínuo e pode ser feita a qualquer época do ano. Trabalhos apresentados em seqüência ou divididos em partes não serão aceitos. Os conceitos emitidos e as referências bibliográficas são de exclusiva responsabilidade dos autores dos trabalhos.

II – PROCEDIMENTO DE RECEBIMENTO E AVALIAÇÃO DOS MANUSCRITOS

Os manuscritos recebidos são analisados inicialmente pelo Editor e pelos Editores Associados. Se forem apresentados de acordo com as normas para publicação da revista, serão encaminhados para membros do Conselho Editorial ou consultores *ad hoc* de reconhecida competência na área de conhecimento para análise e parecer recomendando ou não a sua publicação.

A decisão sobre a publicação de um manuscrito sempre será da Comissão Editorial, que fará uma avaliação do texto original, das sugestões indicadas pelos consultores e das modificações encaminhadas pelo autor. No encaminhamento da versão modificada (corrigida) do seu manuscrito (no prazo de até 60 dias após o recebimento do resultado da avaliação), os autores deverão incluir uma carta ao Editor, esclarecendo as alterações feitas e justificando aquelas que julgaram não pertinentes. Pequenas modificações poderão ser feitas pela própria Comissão Editorial para viabilizar e agilizar o processo de avaliação e publicação. Os artigos que forem aceitos e em processo de publicação, ficarão disponibilizados na página do site www.ser.ufpr.br para consulta. Os manuscritos recusados poderão ser apresentados novamente após uma reformulação substancial do texto conforme indicações dos consultores e da Comissão Editorial e, neste caso, serão encaminhados aos mesmos consultores que revisaram o trabalho anteriormente. O encaminhamento dos artigos à revista implicará na aceitação, por parte dos autores, das normas aqui expressas.

III – APRESENTAÇÃO DOS MANUSCRITOS

Os manuscritos deverão ser encaminhados preferencialmente através do SER (SERVIÇO ELETRÔNICO DE REVISTAS) no site: www.ser.ufpr.br ou diretamente ao Editor Chefe. Não é necessário enviar cópias impressas ou em disquete, pois todo o processo editorial é realizado através do correio eletrônico.

Na preparação dos artigos, deverá ser utilizado o processador de texto MS Word for Windows. Todas as partes do manuscrito devem ser apresentadas em entrelinhamento duplo (com exceção da seção “Referências Bibliográficas”, em entrelinhamento simples), fonte Times New Roman, corpo 12. Não deverão ser utilizados quaisquer recursos especiais na formatação do texto (negritos, destaques etc.), apenas palavras estrangeiras e títulos de livros ou periódicos na lista de referências devem ser escritos em itálico. Os artigos podem ser escritos tanto em português quanto em outras línguas (neste caso, sujeito à aceitação do Conselho Editorial), sendo obrigatórios os resumos em português, inglês e na língua original.

Os manuscritos originais devem ter no máximo 22 páginas, incluindo todas as partes do texto (figuras, tabelas e gráficos)

PARTES DO TEXTO

1. Identificação: a) título do trabalho em português; b) título do trabalho em inglês; c) nome completo dos autores; d) nome e endereço da afiliação institucional dos autores; e) e-mail dos autores;

2. Resumos: a) resumo em português de 150 a 200 palavras (use a ferramenta “contar palavras” no MS Word); b) palavras-chave em português (no mínimo três e no máximo seis, separadas por ponto e vírgula, com ponto final após a última palavra, com letras maiúsculas e minúsculas); c) *abstract* (versão do resumo para o inglês); d) *keywords* (versão das palavras-chave para o inglês com letras maiúsculas e minúsculas).

3. Texto: deve apresentar: introdução, métodos (fundamentação teórica), resultados, discussão e referências bibliográficas. Tabelas e figuras somente deverão ser incluídas se necessárias à clareza do texto, contendo título que traduza essencialmente o que se acha contido nelas (ver instruções específicas para figuras e tabelas no item 6). Deve-se evitar a utilização de notas de rodapé. **4. Lista de Referências:** deverão estar de acordo com as normas da ABNT.

Use entrelinhamento simples nas referências, deixando uma linha em branco entre cada referência.

As referências citadas no texto devem ser listadas em ordem alfabética por sobrenome do primeiro autor na seção de referências bibliográficas.

5. Citações e transcrições:

As referências devem ser citadas no texto indicando o sobrenome do autor, seguido pelo ano da publicação, entre parênteses. Por exemplo: Skinner (1938) apontou que (...). Utilize a letra “e” quando referir-se diretamente ao nome dos autores e utilize “&” quando colocar os nomes entre parênteses, como indicado a

seguir: Gomide e Trindade (1987) mostraram que o autoconceito (...). Ou desta forma: (...) menores infratores foram entrevistados com o objetivo de avaliar seu autoconceito (Gomide & Trindade, 1987).

Quando uma citação referir-se a dois autores, cite sempre os dois. Quando a citação referir-se a três ou mais autores mencione somente o sobrenome do primeiro autor seguido da expressão “et al.”, colocando o ano da publicação. Por exemplo: Sidman et al. (1985).

Ao citar diversos trabalhos entre parênteses, ordene-os sempre alfabeticamente, e não por data.

A data mencionada no texto e nas referências bibliográficas deve ser aquela da edição usada pelo autor. Caso seja importante indicar a data original da edição da obra, faça-o entre parênteses ao final da referência, sem usar ponto final dentro ou fora dos parênteses. Por exemplo: (Original publicado em 1953). Neste caso, indique no corpo do texto a data da publicação original e a data da edição consultada – por exemplo: James (1890/1983).

Ao transcrever um trecho de uma obra, faça-o entre aspas e, ao final da transcrição, cite a página onde se encontra o trecho. Por exemplo: “O psicólogo, quando atua como cientista do comportamento, investiga, descreve e/ou aplica princípios e leis do comportamento” (Danna & Matos, 1982, p. 28). Se o texto transcrito tiver quarenta palavras ou mais, utilize as mesmas regras, mas faça a transcrição em parágrafo distinto, recuado cinco espaços da margem esquerda (na mesma posição de um novo parágrafo), sem aspas, mantendo o espaço duplo.

Uma citação de fonte secundária somente deve ser utilizada quando for realmente indispensável. Por exemplo: Cunha (1976, citado por Fagundes, 1982) sugeriu quatro características necessárias a uma linguagem científica (...). Nas referências bibliográficas, citar apenas a obra consultada (Fagundes, 1982).

6. Figuras e tabelas:

As figuras devem surgir no corpo do texto, diretamente no local considerado adequado pelo(s) autor(es). Não devem ultrapassar 11 cm de largura (horizontal) por 14 cm de altura (vertical), incluindo o espaço da legenda. Devem ser vinculadas ao texto e numeradas sequencialmente com legenda na parte superior. Quando necessário citar a fonte.

Sugere-se utilizar formatos gráficos para as imagens (*.tif, *.gif, *.jpg), salvar as figuras com resolução mínima de 150 dpi e inseri-las no texto com a função “inserir figura” (não utilizar o recurso de copiar e colar).

As tabelas não devem ultrapassar 11 cm de largura (horizontal) por 14 cm de altura (vertical), incluindo o espaço da legenda. Devem ser abertas lateralmente, vinculadas ao texto e numeradas sequencialmente com legenda na parte superior. Quando necessário citar a fonte.

7. Agradecimentos:

Devem ser colocados no final do texto e antes das referências.

8. Nota aos autores:

Ao final do processo de revisão os autores serão informados das alterações/sugestões dos Consultores e deverão proceder a correção do texto, retornando-o ao Editor Associado na formatação final.

Para a submissão do texto final deve ser utilizado o arquivo `template_normas_boletim.doc`, disponível na página do SER (www.ser.ufpr.br). Os artigos que não atenderem às normas serão devolvidos aos autores para as devidas correções.

Verifique cuidadosamente todos os itens das Normas para Publicação antes de enviar o seu manuscrito. O processo de avaliação e a possível publicação serão mais rápidos.