



SeC-UP: UM NOVO MÉTODO PARA O MONITORAMENTO GEODÉSICO DE DESLOCAMENTOS

VINICIUS FRANCISCO ROFATTO¹

MARCELO TOMIO MATSUOKA²

IVANDRO KLEIN³

JHONATTA WILLYAN MIATO ASSUNÇÃO⁴

LINCON SILVA⁵

VALDINEY JOSÉ DA SILVA⁶

¹Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – vfrofatto@gmail.com

²Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – tomiomatsuoka@gmail.com

³Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – ivandroklein@gmail.com

⁴Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – jhonattawillyan@gmail.com

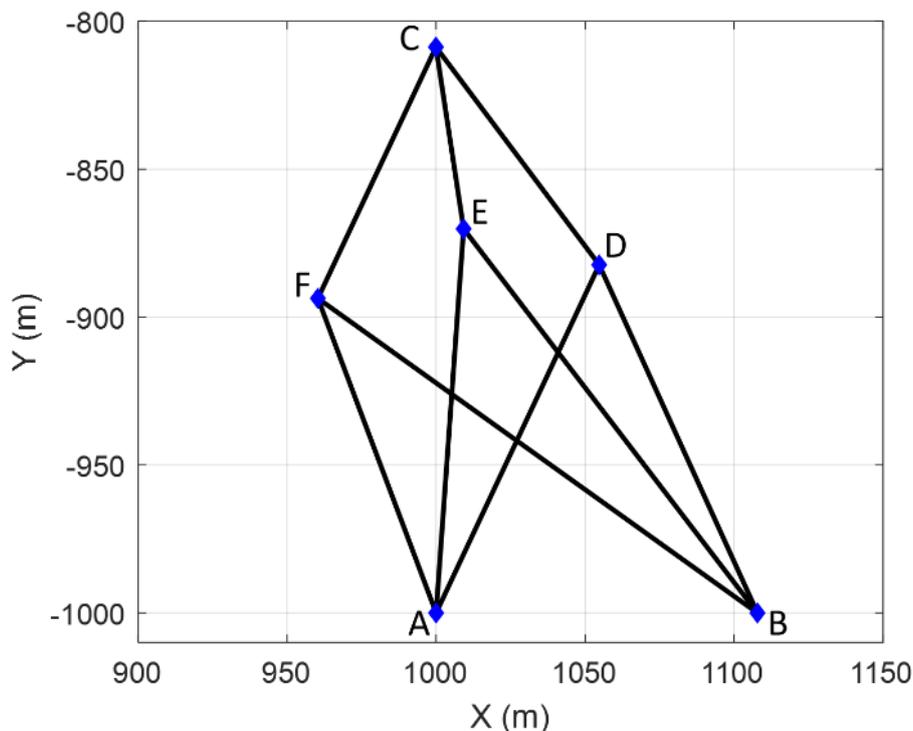
⁵Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – silvarlincon201@gmail.com

⁶Universidade Federal de Uberlândia (UFU) – valdiney@ufu.br

Um dos maiores desafios atuais da análise de dados geodésicos é detectar mudanças geométricas em objetos ou áreas sujeitas a deslocamentos e/ou deslocamentos – estruturas feitas pelo homem, como barragens, diques, pontes, turbinas eólicas ou torres altas – bem como estruturas naturais da Terra, como vulcões, áreas de mineração ou placas tectônicas. Devido ao seu uso comum, limitamo-nos ao modelo de congruência, que apenas nos informa se uma parte de um objeto (ou o objeto inteiro) está deslocada ou não [1]. Tipicamente, os dados de entrada são as diferenças entre as coordenadas dos pontos estimadas por mínimos quadrados em duas épocas distintas. A hipótese nula, denotada por \mathcal{H}_0 , é formulada sob a condição de que todos os pontos são estáveis (estrutura geométrica congruente/rígida em ambas as épocas consideradas). Por outro lado, a hipótese alternativa é estipulada a partir da suposição de que há pelo menos um ponto instável. Como não se sabe qual ponto ou grupo de pontos é instável, um teste de hipótese iterativo é frequentemente aplicado para cumprir com tal objetivo [2]. Tal procedimento de teste é semelhante ao procedimento dataspooing de identificação de outliers [3]. No entanto, procedimentos iterativos não são rigorosos porque as hipóteses alternativas são restritas a apenas um único ponto instável. O ponto considerado mais suspeito de ser instável não é avaliado na próxima iteração. Além disso, o resultado de uma identificação em uma dada iteração condiciona o resultado da iteração seguinte [4]. As desvantagens dos testes de hipóteses iterativos para o caso de múltiplos deslocamentos simultâneos foram relatadas por vários autores [4-7]. Para superar o problema dos procedimentos iterativos, surge o conceito de testes combinatoriais não iterativos, de modo que todas as possíveis combinações de pontos deslocados são consideradas [8,9]. Tal procedimento consiste em comparar todos os possíveis candidatos a pontos instáveis em uma única etapa. Infelizmente, o método combinatorial é frequentemente aplicado a partir de conjuntos de modelos com dimensões diferentes. A comparação entre modelos de diferentes dimensões é complicada neste caso. Por exemplo, quanto maior o número de pontos modelados como instáveis (ou seja, quanto maior a dimensão do modelo de congruência e, portanto, a complexidade do modelo), maior a ocorrência de sobreajustes (overfitting). Um modelo com um maior número de parâmetros tende a se ajustar melhor às observações, mas isso pode levar a sobreajustes. A complexidade do modelo pode ser contornada ao aplicar alguns tipos de penalidades [4]. Entretanto, não está muito claro quais tipos adotar. Embora tenha ocorrido um progresso substancial neste campo da combinatória, ainda existem desafios que abrem novas perspectivas de pesquisa. Nesta contribuição, apresentamos um método que integra análise combinatorial e teste de razão de verossimilhança em um procedimento sequencial, que denominamos de Sequential and Combinatorial Testing for Unstable Points Identification (SeC-UP). O procedimento é uma extensão do método sequencial para detectar múltiplos outliers proposto por Klein et al. [10]. Aqui, o método utiliza as diferenças nas observações entre duas épocas, em vez das coordenadas estimadas, conforme proposto por alguns autores. [11, 12]. Ao adotar as diferenças das observações como o vetor de observações no modelo de Gauss-Markov, por exemplo, não precisamos nos preocupar com o problema de definir o datum e aplicar a transformação-S [13]. Além disso, a influência da geometria da rede na decisão do teste é eliminada. Por outro lado, devemos garantir que as campanhas sejam realizadas com a mesma ocupação dos pontos para que seja possível comparar as medições entre as épocas. Este procedimento foi aplicado e investigado em dois cenários para uma rede de trilateração (Figura 1): (i) deslocamentos simulados em um ambiente computacional; e (ii) deslocamentos intencionais realizados em campo. Na primeira análise, ao considerar o caso de um único ponto deslocado, tivemos seis grupos simulados individualmente: $g_1 := A, g_2 := B, g_3 := C, g_4 := D, g_5 := E, g_6 := F$. A magnitude do deslocamento “ V ” para cada grupo foi definida dentro do intervalo de $[1, 10] \sigma$ com incrementos de 1σ , onde σ é o desvio-padrão da observação, tomado como $\sigma = 2\text{mm}$. Os deslocamentos foram simulados para atuar na seguinte faixa de orientação $[0^\circ, 355^\circ]$ com incremento de 5° . Como resultado, tivemos dez magnitudes de deslocamento para cada uma

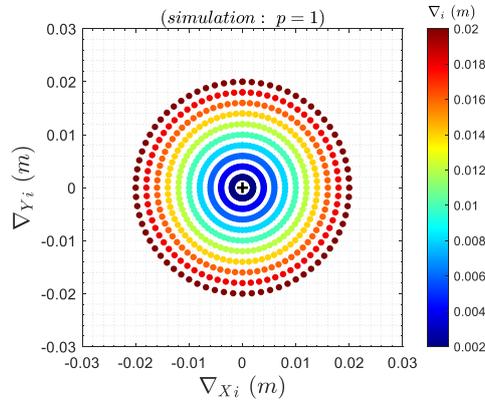
das 72 orientações, totalizando 720 deslocamentos simulados para cada ponto (Fig. 2). Para cada cenário $(g_i, \nabla_j, \theta_k)$, sendo $i = 1, \dots, 6, j = 1\sigma, \dots, 10\sigma$ e $k = 0^\circ, \dots, 355^\circ$, foram gerados 200.000 eventos aleatórios (experimentos Monte Carlo). Testes diferentes níveis de significância foram testados e eficientemente controlados por Monte Carlo (α_t). A Figura 3 mostra o resultado da taxa de correta identificação. Os círculos em preto representam os deslocamentos radiais de 4mm, 1cm e 2cm. Observa-se, claramente, que a probabilidade de correta identificação depende da geometria da rede. Note que as maiores taxas de sucesso ocorrem na direção da linha de visada. Por outro lado, é mais difícil identificar nas direções perpendiculares a estas, principalmente para magnitudes próximas à incerteza do método de levantamento. O aumento do nível de significância e, conseqüentemente, uma região de rejeição maior (valores críticos menores) favorece a identificação de deslocamentos de baixa magnitude. Por outro lado, níveis de significância mais elevados reduzem (ligeiramente) a probabilidade de identificar corretamente deslocamentos de maiores magnitudes. No segundo cenário, a rede geodésica descrita na Figura 1 foi materializada em campo. Para isso, as distâncias foram obtidas utilizando a estação total FOIF OTS 685, com incerteza linear de 2mm + 2ppm (especificações do fabricante). Bases nivelantes foram utilizadas tanto para a Estação Total quanto para os Prismas Refletores. Na Época 1, os pontos não tiveram deslocamentos, enquanto na Época 2 foram aplicados intencionalmente deslocamentos aos pontos. Os pontos A, B e C foram mantidos fixos, ou seja, não sofreram deslocamento, enquanto D, E e F foram considerados os pontos a serem monitorados. Os deslocamentos foram realizados em campo, deslocando o refletor 1 cm da posição inicial (Época 1) para as novas posições (Época 2), conforme indicado na Figura 4. A Tabela 1 mostra que dos 23 experimentos, somente 6 foram sinalizados como Erro Tipo III (identificar um ponto estável como instável, enquanto o verdadeiro ponto instável não é identificado). A detecção de deslocamentos ocorreu para todos os experimentos. Embora a identificação seja importante para localizar o deslocamento, a detecção desempenha um papel dominante para as atividades que envolvem risco à segurança (sistemas de segurança crítica), como a análise de deslocamentos. É preferível que a detecção ocorra, mesmo que ocorram falhas na identificação. É crucial que um sistema emita um alarme quando deslocamentos são detectados, mesmo que a localização destes possa estar incorreta. Nesse sentido, observamos também que aumentar o nível de significância nem sempre melhora a taxa de identificação, mas sempre melhora a detecção, embora também aumente as taxas de falso alarme. Mais experimentos para diferentes redes geodésicas serão necessários para avaliar o desempenho do método proposto. Por fim, é importante destacar que o método proposto pode ser estendido para o problema de Detecção de Outliers.

Figura 1 – Rede Horizontal de Trilateração.



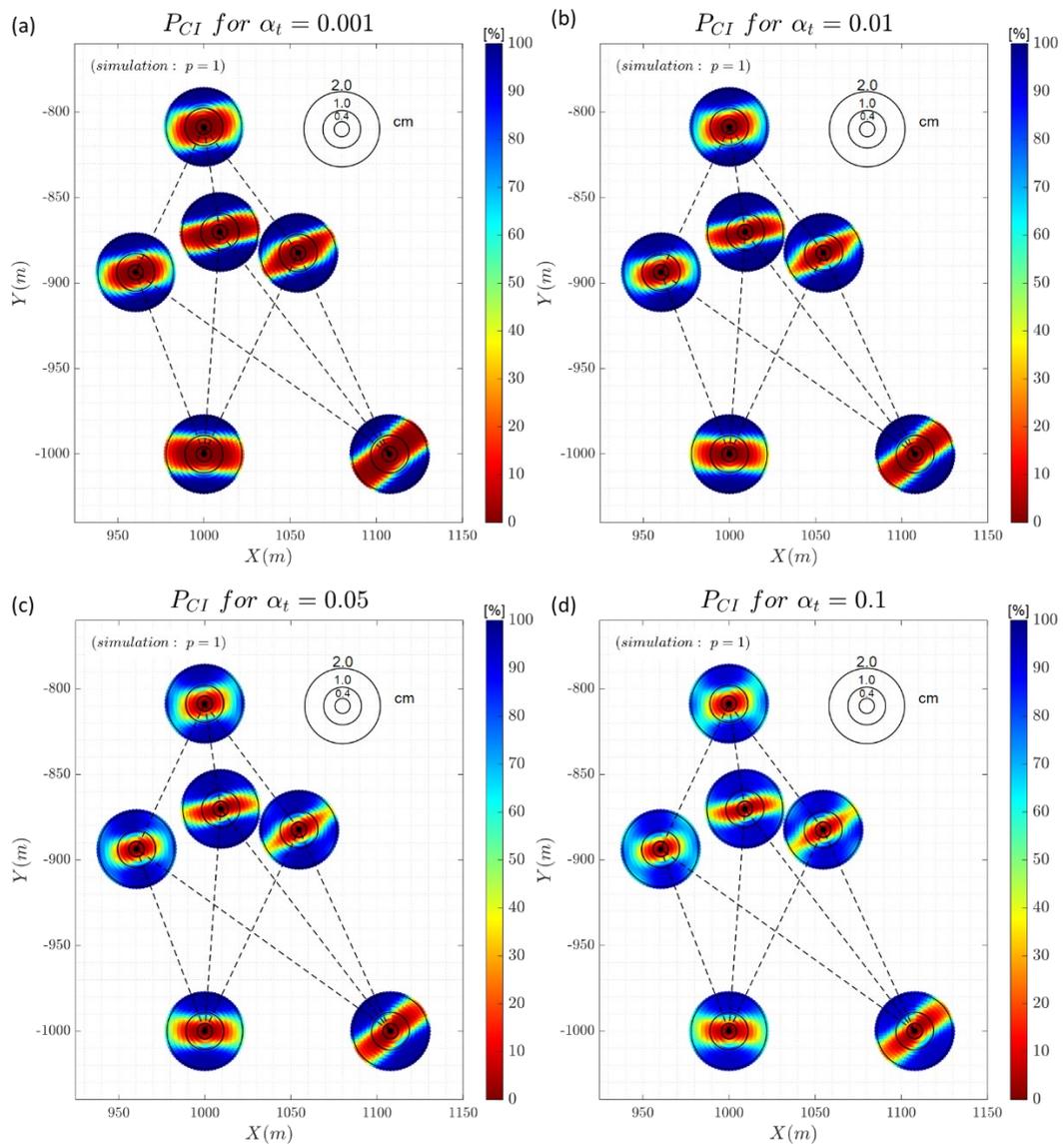
Fonte: Os autores (2024).

Figura 2 – Deslocamentos simulados em ambiente computacional.



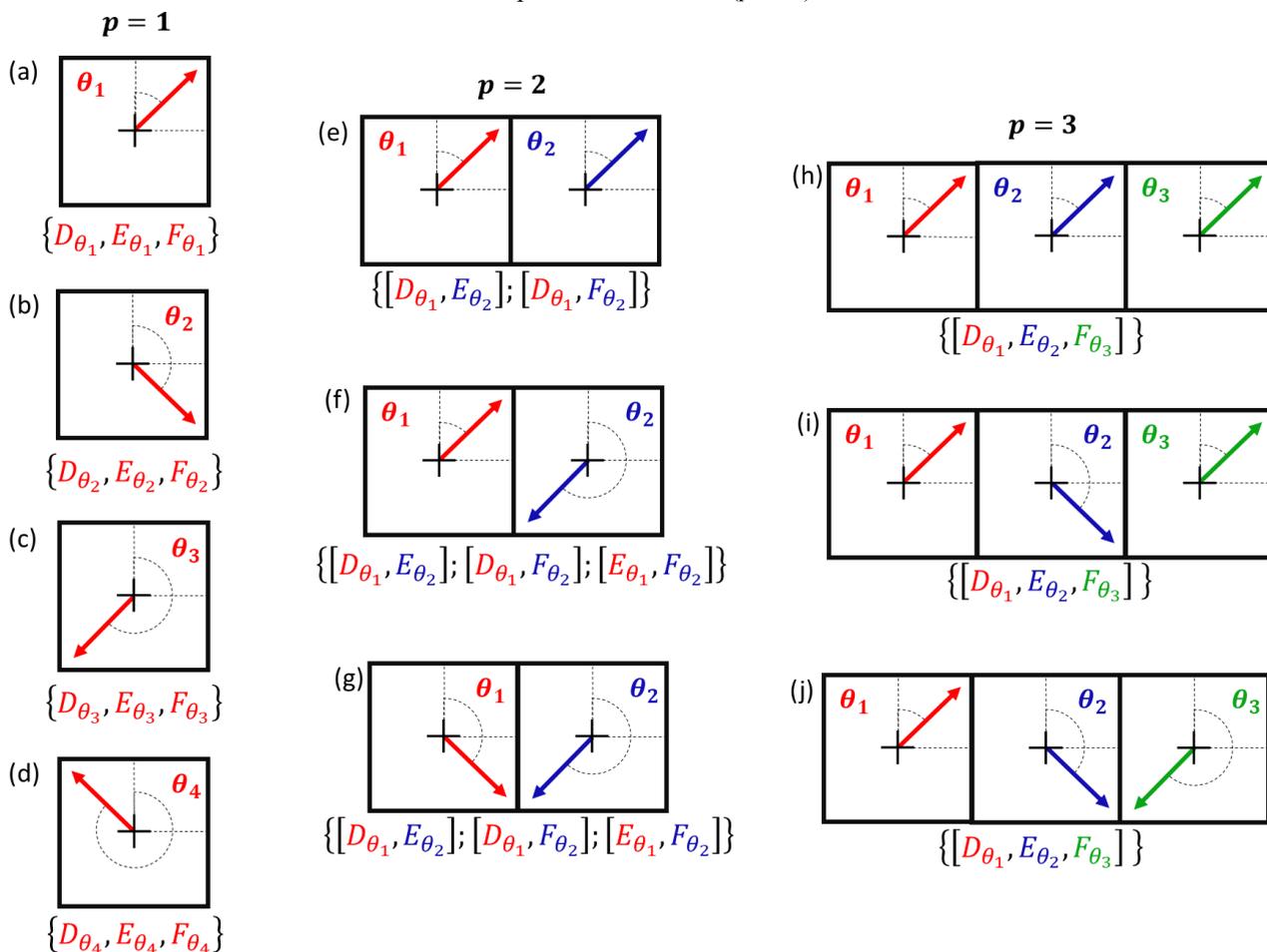
Fonte: Os autores (2024).

Figura 3 – Taxa de sucesso em termos de identificação do ponto instável.



Fonte: Os autores (2024).

Figura 4 – Padrões de deslocamentos simulados em campo para um ponto ($p = 1$), dois pontos simultâneos ($p = 2$) e três pontos simultâneos ($p = 3$).



Fonte: Os autores (2024).

Tabela 1 – Desempenho do *SeC-UP* para padrões de deslocamentos mostrados na Figura 4 para $\alpha_t = 0,1$.

Padrões	Correta Detecção	Correta Identificação	Falsa Identificação
(a)	3	3	0
(b)	3	3	0
(c)	3	3	0
(d)	3	3	0
(e)	2	2	0
(f)	3	1	2
(g)	3	3	0
(h)	1	0	1
(i)	1	1	0
(j)	1	1	0
Total	23	20	3
Taxa (%)	100	86.96	13.04

Fonte: Os autores (2024).

Palavras-chaves: Geodesy; Deformation; Monitoring; Testing; Monte Carlo; Quality Control.

Referências

- [1] PELZER, H. *Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen*. Tese (in German). Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C: Dissertationen - Heft Nr. 164, München, Germany, 1971.
- [2] LEHMANN R.; LÖESLER, M. Congruence analysis of geodetic networks – hypothesis tests versus model selection by information criteria. **Journal of Applied Geodesy**, vol. 11, no. 4, 2017, pp. 271-283.
- [3] BAARDA, W. **A testing procedure for use in geodetic networks**. Netherlands: Netherlands Geodetic Commission, Delft, Publication on Geodesy, 1968. (Nota técnica Vol. 2, Number 5).
Disponível em: <https://www.ncgeo.nl/downloads/09Baarda.pdf> (Acesso em 19 de jul. de 2024)
- [4] NOWEL, K. Specification of deformation congruence models using combinatorial iterative DIA testing procedure. **Journal of Geodesy**, vol. 94, n. 118, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01446-9>
- [5] DURDAG, U. M.; HEKIMOGLU, S.; ERDOGAN, B. Reliability of models in kinematic deformation analysis. **Journal of Surveying Engineering**, vol 144, n. (3), 2018.
- [6] ERDOGAN, B.; HEKIMOGLU, S. Effect of subnetwork configuration design on deformation analysis. **Survey Review**, vol. 46, n. (335), pg. 142–148, 2014.
- [7] HEKIMOGLU, S.; ERDOGAN, B.; BUTTERWORTH, S. Increasing the efficacy of the conventional deformation analysis methods: alternative strategy. **Journal of Surveying Engineering**, vol 136, no. (2), pg. 53–62, 2010.
- [8] VELSINK, H. On the deformation analysis of point fields. **Journal of Geodesy**, vol. 89, pg. 1071–1087, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0835-z>
- [9] VELSINK, H. Testing methods for adjustment models with constraints. **Journal of Surveying Engineering**, vol. 144, no. (4), 2018.
- [10] KLEIN, I. *et al.* An approach to identify multiple outliers based on sequential likelihood ratio tests. **Survey Review**, vol. 49, no. 357, pg. 449-457, 2017. <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1212970>
- [11] NOWEL, K.; KAMIŃSKI, W. Robust estimation of deformation from observation differences for free control networks. **Journal of Geodesy**, vol 88, no. (8), pg. 749–764, 2014.
- [12] ERDOGAN, B.; HEKIMOGLU, S.; DURDAG, U. M. A new univariate deformation analysis approach considering displacements as model errors. **Stud. Geophys. Geod.**, vol 65, pg. 1-14, 2021.
- [13] BAARDA, W. **S-Transformation and Criterion Matrices**. Netherlands: Netherlands Geodetic Commission, Delft, Publication on Geodesy, 1973. (Nota Técnica: New Series, Vol. 5, No. 1).
Disponível em: <https://ncgeo.nl/downloads/18Baarda.pdf> (Acesso em 19 de jul. de 2024)