

Viabilidade de Utilização de Tecnologia INSAR na Verificação de Deslocamentos Verticais Terrestres

Elana Andrade de Oliveira Farias

Mestranda em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,
elana@poli.ufrj.br

Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Engenheira Geotécnica e Professora, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,
jannuzzi@coc.ufrj.br

RESUMO: A utilização de imagens obtidas por radar é relativamente recente nos estudos de deslocamentos terrestres, mas permitem um controle de obras diversas onde outras tecnologias são mais custosas e demoradas na obtenção de resultados. Este estudo traz como objetivo uma reprodução de treinamento da metodologia InSAR (Interferometria por Radar de Abertura Sintética, do inglês *Interferometric Synthetic Aperture Radar*), usando como modelo, resultados já conhecidos da região de Katowice, Polônia e com isso a descrição das dificuldades encontradas na metodologia, bem como suas facilidades de utilização. Os resultados obtidos no programa de processamento da Agência Espacial Europeia (ESA), chamado SNAP, foram posteriormente processados no *Google Earth* e no *ArcGIS PRO* para melhor visualização dos valores e posterior comparação com os resultados já disponibilizados no tutorial fornecido pela ESA. Os resultados encontrados mostram que a reprodução foi bem-sucedida e que foi possível mapear os prós e contras da utilização da metodologia fornecida para verificação de deslocamentos verticais na superfície terrestre.

PALAVRAS-CHAVE: Deslocamentos Terrestres, InSAR, Sensoriamento Remoto, Radar, SIG, Validação de metodologia.

ABSTRACT: The use of radar images in the study of land displacements is relatively recent, but it allows for the monitoring of various construction projects where other technologies are more costly and time-consuming to yield results. This study aims to replicate the InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) methodology using known results from the Katowice region, Poland, and to describe the difficulties encountered in the methodology, as well as its ease of use. The results obtained from the European Space Agency's (ESA) processing program, called SNAP, were subsequently processed in Google Earth and ArcGIS PRO for better visualization of the values and for comparison with the results already provided in the ESA tutorial. The findings indicate that the replication was successful and that it was possible to map the pros and cons of using the provided methodology for verifying vertical displacements on the earth's surface.

KEYWORDS: Land Displacements, InSAR, Remote Sensing, Radar, GIS, Methodology Validation.

1 INTRODUÇÃO

As fontes científicas brasileiras têm resultados limitados em estudos com a tecnologia "InSAR" (Interferometria por Radar de Abertura Sintética, do inglês *Interferometric Synthetic Aperture Radar*). Isso sugere uma escassez de pesquisas ou uma menor produção científica nessa área no Brasil. No entanto, a relevância do tema para a detecção de movimentos de terra em estruturas como pontes, encostas e barragens é reconhecida. O potencial do uso do InSAR em várias áreas do país é significativo, trazendo benefícios importantes para o monitoramento e prevenção de desastres naturais, entre outras aplicações de interesse público. Investimentos nessa área são considerados promissores (Gama, 2023).

O uso de InSAR, sendo reconhecidamente uma tecnologia de sensoriamento remoto, possui uma grande vantagem econômica, já que possui menor custo do que investigações realizadas no local (Ferreti et al, 2001), e um menor tempo de pesquisa. O monitoramento de áreas em movimento é crucial para a tomada de decisões

preventivas e a mitigação de riscos, minimizando danos potenciais. Este estudo visa avaliar a metodologia InSAR como ferramenta para estudar subsidência. Os objetivos específicos incluem a revisão da teoria subjacente e a validação de um estudo de caso existente, replicando-o para avaliar a disponibilidade de imagens e a facilidade de uso da metodologia em software gratuito.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Histórico SAR

Entendendo que, na maioria das vezes, o tema pode parecer complexo é importante salientar suas origens, que passam por equações essenciais da física. Além da base, também é importante conceituar os aspectos mais relevantes do tema da Interferometria SAR.

2.1.1 Eletromagnetismo

A história do eletromagnetismo está relacionada a eventos importantes, que vão desde a primeira afirmação da velocidade constante e finita da luz, por Ole Rømer (Helerbrock, 2023), até a unificação das teorias que descrevem as forças da eletricidade e magnetismo. Este último fato se deu por conta das Equações de Maxwell (Millar, 1996), que demonstravam as perturbações ocorridas entre os campos elétrico e magnético ao mesmo tempo. Com base nas leis já existentes na época, James Maxwell unificou as equações que auxiliam na compreensão das interações entre os dois campos.

2.1.2 Equações de Maxwell

A variação de cargas elétricas resulta em ondas eletromagnéticas ao longo do tempo, sendo tais ondas propagadas com velocidade constante. As equações propostas por Maxwell possuem quatro leis, a saber:

Tabela 1. Leis que compõem as Equações de Maxwell.

Nome da Equação	Fórmula Diferencial
Lei de Gauss para campos elétricos	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ (1)
Lei de Gauss para campos magnéticos	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$ (2)
Lei de Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (3)
Lei de Ampère-Maxwell	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ (4)

Em que:

E = campo elétrico; B = campo magnético; ρ = densidade de carga elétrica; μ_0 = constante magnética ($1,2566 \times 10^{-6} \frac{H}{m}$); \vec{J} = densidade de corrente; ϵ_0 = constante elétrica ($8,854187 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$).

As ondas eletromagnéticas, com comprimentos de onda entre 1 mm e 100 cm, são usadas em radares e viajam à velocidade da luz, seguindo um movimento retilíneo e uniforme.

2.2 Conceitos Norteadores

Alguns conceitos no InSAR são importantes de serem pontuados, principalmente quando toda a estrutura da metodologia se baseia nos dados obtidos por radares para que a interferometria seja aplicada nas imagens que trarão os resultados de possíveis deslocamentos terrestres.

2.2.1 Radares

Os radares são um tipo de sensor ativo que transmitem energia eletromagnética, atingindo um alvo e retornando o eco para registro. Os radares utilizam micro-ondas para medir distâncias entre o radar e o alvo. Parte das ondas é refletida e processada para determinar a posição espacial do alvo, enquanto apenas uma pequena porção retorna ao emissor.

Os radares de abertura sintética (do inglês *Synthetic Aperture Radar* – SAR) possuem uma técnica que simula uma antena de radar maior do que a original, obtendo imagens de alta resolução mesmo à grandes distâncias do objeto de estudo.

O SAR utiliza, majoritariamente, a geometria de passada (ou visada) lateral (*side looking*), onde o radar faz medições de forma lateral, ao invés de forma perpendicular ao alvo. Os impulsos emitidos lateralmente são retornados com tempos diferentes, o que permite discriminar os objetos. O atraso no tempo do sinal recebido em relação ao sinal transmitido permite saber a distância do objeto ao radar (Henderson & Lewis, 1998).

Um exemplo de imagens SAR são as provenientes da missão Sentinel-1, que é composta por uma constelação de dois satélites de operação contínua. Eles operam na banda C de frequências (entre 3,75 – 7,5 GHz). Os dados adquiridos são disponibilizados gratuitamente pela Agência Espacial Europeia (do inglês *European Space Agency* – ESA) e algumas de suas aplicações são: monitoramento geofísico de riscos naturais: terremotos, vulcões e deslizamentos de terra; análise de séries temporais da deformação da superfície: subsidência e estabilidade estrutural; análise de movimentação de geleiras; mapeamento de elevação digital (ESA, 2022b). O ciclo de captura de imagens de um mesmo local é de aproximadamente 12 dias, e na linha do Equador este intervalo cai para 6 dias entre duas aquisições (ESA, 2023).

2.2.2 Interferometria

A interferometria compara a diferença de fase entre duas imagens, revelando mudanças na superfície terrestre ao longo do tempo, como subsidência. Isso é feito estudando a interferência das ondas eletromagnéticas emitidas e comparando-as entre as imagens. Uma das vantagens de utilização da interferometria por técnicas de radar, comparativamente às ópticas, é a capacidade de operação à noite, bem como através de nuvens. O radar é um sensor ativo, não necessitando de iluminação, já que produz iluminação própria (Carvalho, 2022).

A frequência do sinal emitido (GHz) pelo radar na captura de imagens define a penetração das micro-ondas na superfície de análise. Também há a dependência da umidade da região de estudo e a densidade de vegetação local (DPI/INPE 2022). Diferentes frequências de radar são aplicadas para diversos fins, com menor frequência oferecendo maior penetração na superfície. Durante a captura dos sinais de retorno, a característica da superfície é refletida na amplitude e fase da micro-onda de retorno, contribuindo para a formação de pixels na imagem. A informação de fase pode sofrer interferência destas características da superfície, o que é considerado um ruído (ESA, 2022a), já que o sinal interagiu com muitos espalhadores de sinais. Estes ruídos geram um efeito granular na imagem, fazendo com que não possuam forma tão nítida. Ao longo da análise das imagens é necessário o uso de alguns algoritmos para reduzir este efeito (DPI/INPE 2022).

Outra característica da interferometria é o tipo de polarização da imagem estudada, que se relaciona com a direção do campo eletromagnético e a direção de propagação da onda do sinal. As antenas SAR podem emitir e receber sinais em mais de uma polarização, e a direção da propagação do campo elétrico que determina a polarização recebida pelo sensor. Uma polarização do tipo VV (emite Vertical e recebe Vertical) será mais adequada para identificação de objetos verticais, já uma polarização tipo HH (emite Horizontal e recebe Horizontal) será mais adequada para identificação de objetos horizontais (Pantoja, 2018).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

A área de estudo está na região metropolitana de Katowice, na Polônia, e foi usada para fins de treinamento do programa e de percepções da metodologia InSAR para subsidência. Todo o tutorial foi

fornecido pela ESA (Braun & Veci, 2021), assim como os dados de entrada. A região sofre de subsidência há anos devida intensa exploração de minas de carvão na área, com posterior inundação destas. Na figura 1 é mostrada a área de interesse indicada em azul e a imagem de satélite adquirida em vermelho.

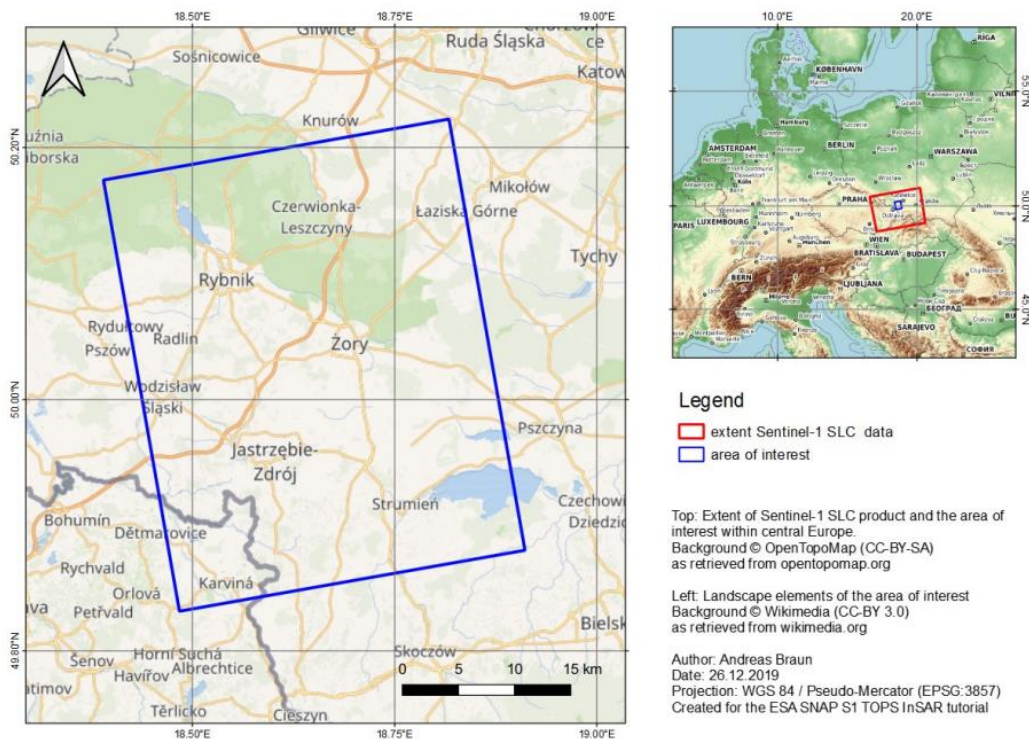


Figura 1. Mapa de localização da primeira área de estudo (Katowice, Polônia).

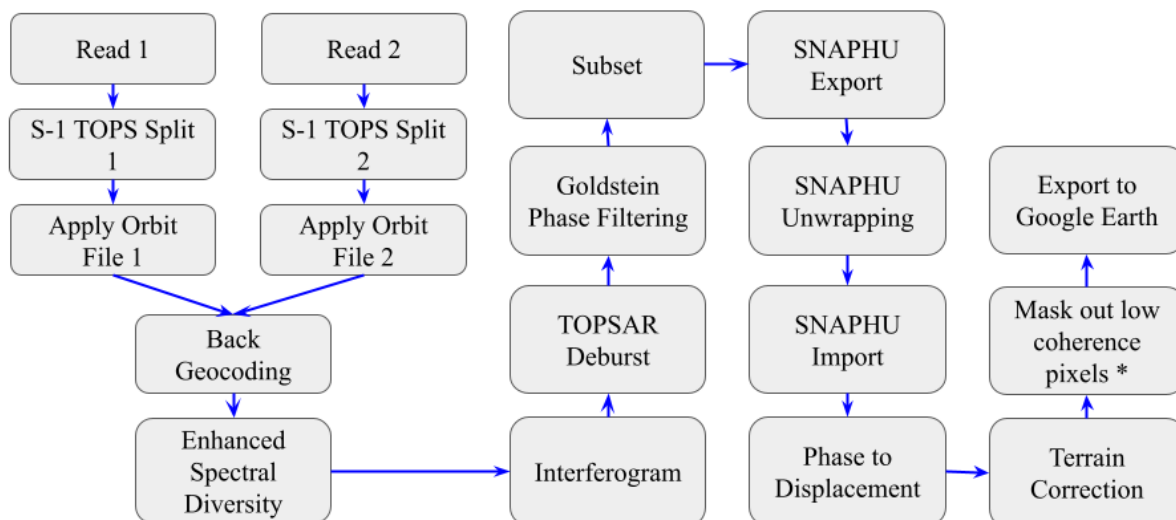
3.2 Programas Utilizados

Os dois programas utilizados foram o SNAP (*Sentinel Application Platform*) e o Google Earth. O software SNAP, desenvolvido por várias empresas, incluindo *Brockmann Consult* e distribuído pela ESA, é uma aplicação gratuita para processamento de dados de satélites Sentinel, com ferramentas para análise de imagens de outros satélites. Lançado em 2003 como uma caixa de ferramentas específica, hoje é amplamente utilizado para análise de imagens de radar do satélite Sentinel-1, especialmente para interferometria em imagem SAR (InSAR) (ESA, 2022c).

O Google Earth, lançado em 2004 após a aquisição da *Keyhole* pelo *Google*, é um programa de mapeamento gratuito que oferece imagens de satélite e modelos 3D de diversos locais do planeta. A versão para desktop foi usada neste trabalho, destacando-se por recursos avançados para análises em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Ele permite importação rápida de imagens para georreferenciamento e visualização de arquivos SIG, facilitando a criação de feições como linhas, polígonos e pontos (Mota, 2021).

4 VALIDAÇÃO DO TUTORIAL

Com a replicação do tutorial, algumas anotações e estudos foram realizados, entre eles a esquematização da cadeia de funções utilizadas no programa SNAP. Com aproximadamente 16 etapas, na figura 2 é mostrada a sequência indicada no tutorial para a aplicação da metodologia InSAR no estudo de subsidência em Katowice.



A operação “Mask out low coherence pixels” não é uma função, é apenas uma alteração nas propriedades do arquivo. Um filtro que faz com que áreas de baixa coerência não sejam mostradas na imagem final.

Figura 2. Cadeia de funções utilizadas nas análises.

A esquematização das funções ajuda a compreender as etapas da metodologia e sua aplicação em outras áreas usando o programa SNAP. O estudo começa com o download de duas imagens Sentinel-1 do mesmo local (datas de 08/12/2019 e 20/12/2019) do site *Copernicus Open Access Hub*. É necessário um cadastro para obtenção das imagens. Como intuito de auxiliar em uma das etapas, houve necessidade de baixar um plugin para o SNAP.

As primeiras etapas incluem selecionar as partes relevantes da imagem do radar e obter informações de posicionamento da órbita do satélite no momento da captura das imagens. Em seguida, as imagens são sobrepostas considerando a elevação do local e ajustes no posicionamento baseados na captura pelo radar.

Após uma validação visual da sobreposição, o processo continua com a formação do interferograma e a estimativa de coerência da imagem, tendo a coerência informações sobre a qualidade da imagem com base na fase, com cores mais claras indicando alta coerência e cores mais escuras indicando menor coerência, variando de 0 a 1. Áreas densamente arborizadas, como florestas, tendem a ter valores de coerência mais baixos, tornando-os menos úteis para análise nessas regiões.

As próximas etapas incluem aprimoramento do interferograma, redução de ruídos, remoção de linhas entre imagens, transformação de fases em topografia com um plugin específico, conversão de unidades de medida e correções de distorções geométricas. Em seguida, áreas com baixa coerência são filtradas para evitar resultados equivocados. O resultado é exportado para o Google Earth após selecionar uma paleta de cores no SNAP para melhor visualização. A imagem final pode ser salva e visualizada no programa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado da análise InSAR foi satisfatório e bem próximo das indicações de deslocamentos mostrados no tutorial e a comparação pode ser vista a seguir, onde na imagem 3 é mostrado o resultado do tutorial e na imagem 4 é mostrado o resultado da reprodução do tutorial.

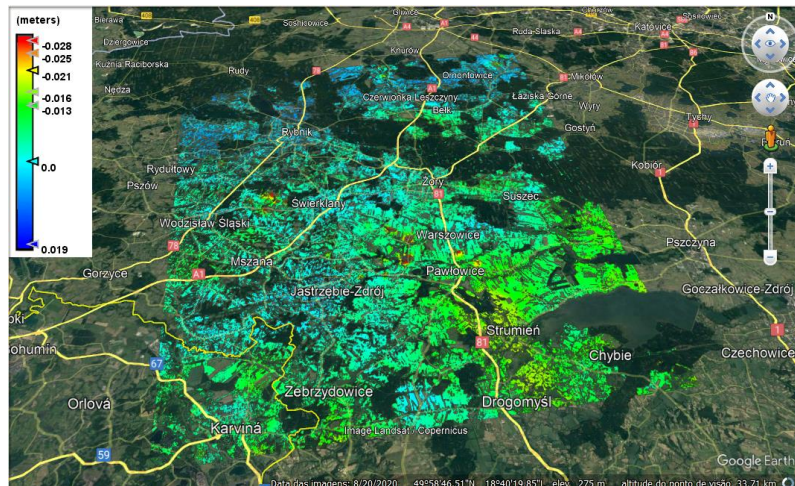


Figura 3. Imagem do resultado mostrado no tutorial.

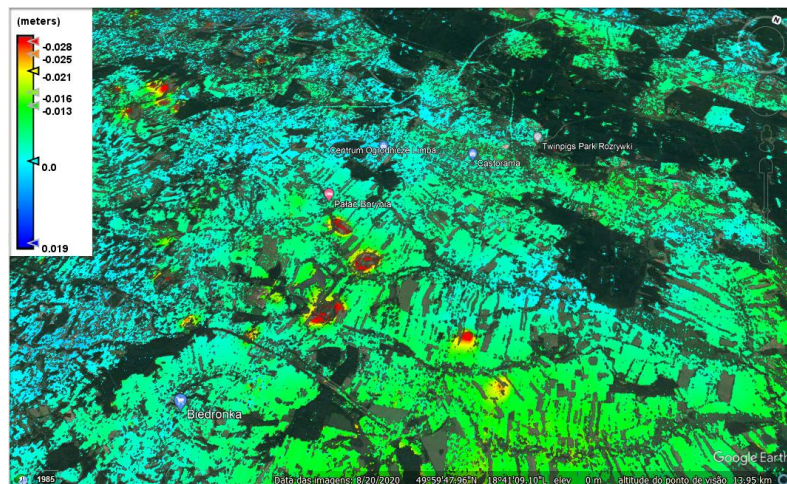


Figura 4. Imagem no Google Earth do resultado da reprodução do tutorial.

Os resultados de deslocamentos verticais variam de $-0,028$ a $+0,019$ m, onde valores negativos indicam subsidência (destacadas em vermelho) e valores positivos, soerguimento do terreno (tons de azul claro e verde claro). É possível construir, dentro do programa SNAP, um gráfico que mostra os deslocamentos verticais ao longo de um trajeto. Fazendo uma reprodução desta função, foi desenhada uma linha na área de maior subsidência (figura 5), que gerou a imagem 6 com um gráfico de deslocamentos.

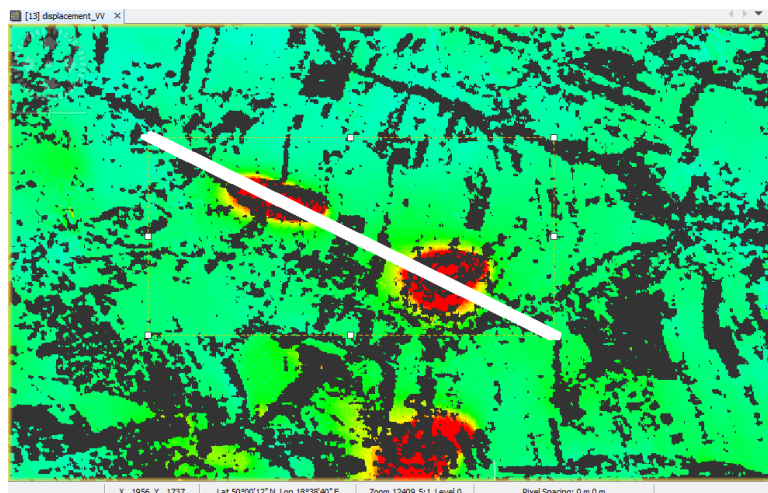


Figura 5. Linha desenhada em área de subsidência no SNAP.

A linha, em sua totalidade, passa por determinados pixels da imagem, que foram classificados entre 0 a pixel 338. Para cada um desses, foram colocados os respectivos deslocamentos (figura 7).

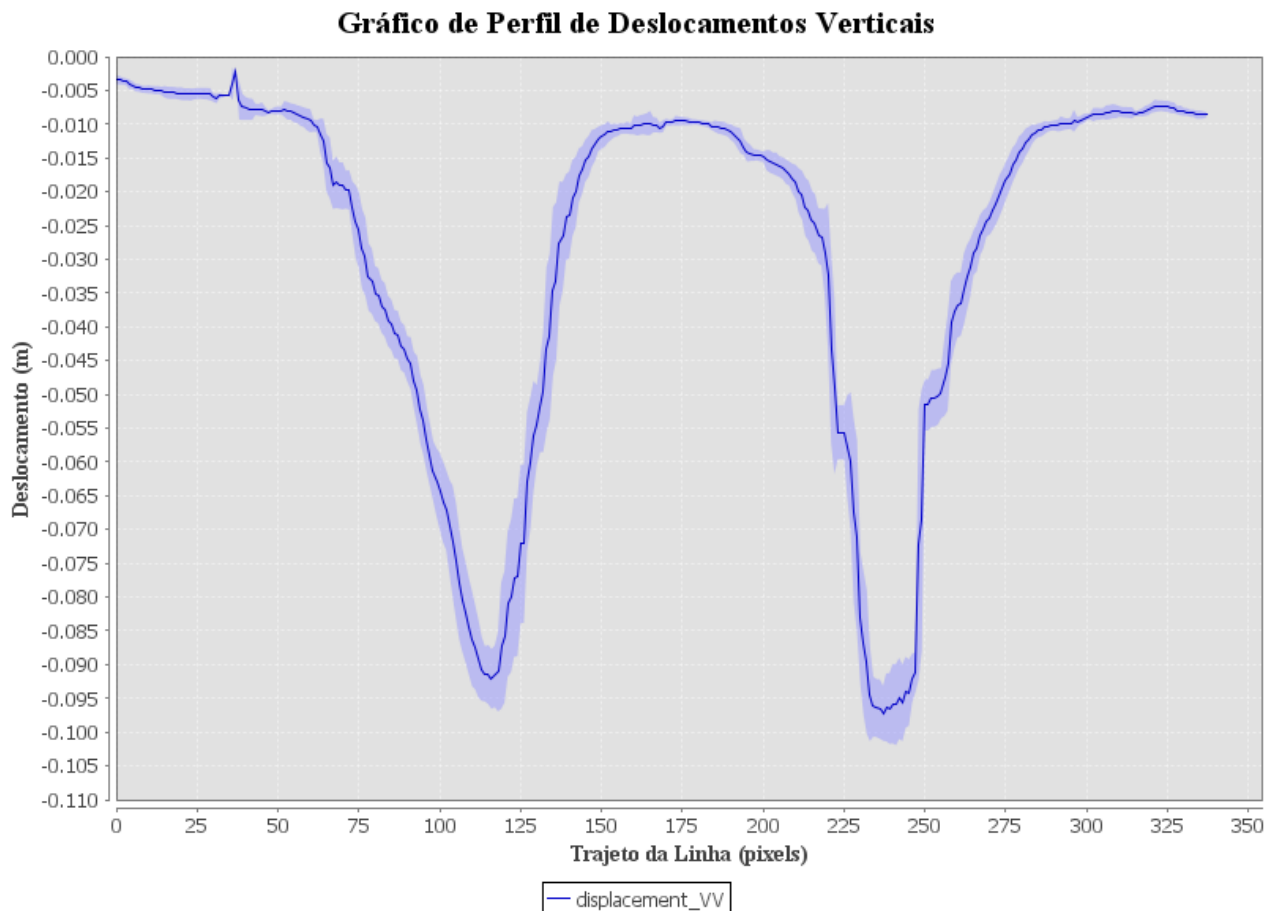


Figura 6. Perfil de deslocamentos verticais na trajetória desenhada na imagem.

Os resultados mostrados indicam que nas áreas em vermelho há um maior deslocamento do que nas áreas de cores mais esverdeadas/azuladas e o maior valor de subsidência encontrado é de -0,097m.

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, entende-se que a utilização do programa SNAP possui várias etapas de tratamento das imagens, essenciais para a metodologia e o resultado final. A atenção aos detalhes de cada etapa é crucial, pois erros podem impedir o avanço ou gerar resultados equivocados.

Apesar da metodologia ser recente, os materiais disponíveis datam de anos próximos ao lançamento do SNAP, o que pode ocasionar falta de informações recentes. Além disso, a maioria dos tutoriais foi produzida em regiões de clima temperado, causando diferenças na aplicação em climas tropicais, como o Brasil.

As imagens gratuitas geralmente possuem menor resolução que as pagas, dificultando estudos detalhados.

Por fim, o uso de InSAR neste trabalho, com a reprodução do tutorial fornecido pela ESA, se mostrou muito positivo, visto que o passo-a-passo auxilia nas muitas etapas a serem aplicadas nos estudos e os resultados mostram, de fato, as regiões com indicação de deslocamentos verticais, uma informação relevante a nível governamental e social, podendo ter a inclusão de seus resultados em tomadas de decisões sobre o território e auxiliando na preservação da integridade da população local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAUN, Andreas; VECI, Luis. (2021) ESA. *TOPS Interferometry Tutorial. Sentinel-1 Toolbox*. Disponível em: <https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2021.
- CARVALHO, N. C. R. L. (2022) PGCAP INPE. *Mini-curso: Fundamentos de Imagem SAR - Naiallen Carvalho* (9 de Abril). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=nWh12Y89JUs&t=15825s>>. Acesso em: 22 ago. 2022.
- DPI/INPE. (2022) *Sistemas de Radar*. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/radar.html>>. Acesso em: 22 ago. 2022.
- ESA. (2022a) Eduspace. *Radar de Abertura Sintética (SAR - Synthetic Aperture Radar)*. Disponível em: <https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_PT/SEMF5D6UQH_0.html#:~:text=As%20imagen s%20SAR%20s%C3%A3o%20C3%BAtais,pontos%22%20para%20imageim%20SAR>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- ESA. (2022b) Copernicus. *About Copernicus Sentinel-1...* Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/documents/247904/4603794/Sentinel-1-infographic.pdf>> Acesso em: 23 out. 2022.
- ESA. (2022c) *SNAP spurs Earth observation innovation with one million downloads*. Disponível em: <https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/SNAP_spurs_Earth_observation_inno vation_with_one_million_downloads??haha>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- ESA. (2023) *Sentinel-1 Observation Scenario*. Disponível em: <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario>>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- FERRETTI, A., PRATI, C., & ROCCA, F. (2001) Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (1), p.8-20.
- GAMA, F. F. et al. (2020) *Deformations prior to the Brumadinho dam collapse revealed by Sentinel-1 InSAR data using SBAS and PSI techniques*. Disponível em: <<https://www.preprints.org/manuscript/202008.0391/v1>> Acesso em: 12 mar. 2023.
- HELERBROCK, R. (2023) *Velocidade da luz*. Mundo Educação. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/velocidade-luz.htm>>. Acesso em: 09 mar. 2023.
- HENDERSON, F. M.; Lewis, A. J. (1998) *Radar. In: Manual of remote sensing: principles and application of imaging radar*. New York: John Wiley & Sons, v. 2, Cap. 1, p. 1-6.
- MILLAR, D. et al. (1996) *The Cambridge Dictionary of Scientists. Cambridge University Press*. Globo. Enciclopédia da Ciência. Editora Globo, 1996. Disponível em: <<https://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/maxwell.htm>>. Acesso em 08 mar. 2023.
- MOTA, PH. (2021) R7. Segredos do Mundo. *Google Earth – História e tecnologia do aplicativo de exploração do planeta*. Disponível em: <<https://segredosdomundo.r7.com/google-earth/>>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- PANTOJA, L. M. A (2018) *Importância do Radar de Visada Lateral na Cartografia da Amazônia Brasileira. Um estudo de caso na serra do Acaraí – PA*. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura. Universidade Federal Rural Da Amazônia. Belém. Disponível em: <https://graduacaoeca.ufra.edu.br/images/___Novos_documentos/TCC_LARISSA.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.