

Aplicação da Técnica DInSar para Monitoramento de Deslocamentos de Talude em Faixa de Dutos no Estado da Bahia

Leonardo Augusto Barbosa Lemos

Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, leonardolemos@poli.ufrj.br

Marcos Barreto de Mendonça

Professor Associado, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, mbm@poli.ufrj.br

RESUMO: Grande parte da rede de dutos de petróleo e derivados no Brasil passa por terrenos acidentados e suscetíveis a movimentos de massa, que podem afetar a operação de escoamento destes produtos. Rupturas de oleodutos ocasionadas por processos de movimentos de massa, geralmente, estão associadas a grandes prejuízos sociais, econômicos e ambientais, além de exigirem longo tempo de reparo das instalações afetadas. O monitoramento dos taludes ao longo da faixa de oleodutos é extremamente importante para a avaliação contínua da segurança e tomada de decisão sobre ações de redução de riscos, principalmente, em situações emergenciais. Uma das grandezas que podem ser monitoradas com esta finalidade é a evolução da velocidade de deslocamentos do talude. O presente trabalho visa apresentar e discutir resultados iniciais da aplicação da técnica de interferometria por radares de abertura sintética (SAR) para monitoramento de um talude em processo de rastejo junto a uma faixa de dutos. O estudo evidencia o potencial de aplicação da técnica para monitoramento destas áreas. Porém, resultados iniciais da aplicação para o caso estudado indicam limitações da técnica, destacando-se o efeito da cobertura vegetal na qualidade dos pares interferométricos, expressa pela baixa coerência entre as imagens.

PALAVRAS-CHAVE: Interferometria, InSAR, DInSAR, Talude, Rastejo, Monitoramento.

ABSTRACT: A large part of the network of oil and oil products pipelines in Brazil passes through uneven terrain and is susceptible to mass movements, which can affect the flow of these products. Pipeline ruptures caused by mass movements are generally associated with major social, economic and environmental losses, in addition to requiring long repair times for the affected facilities. Monitoring the stability of slopes along the pipeline strip is extremely important for the continuous assessment of safety and decision-making on risk reduction actions, especially in emergency situations. One of the quantities that can be monitored for this purpose is the speed of displacement of this slope over time. The present work aims to present and discuss the results of the application of the interferometry technique using synthetic aperture radars (InSAR) to monitor the displacements of a slope next to a pipeline strip that is in the process of creep. The study indicates that the technique has great potential for application in monitoring these areas and ensuring greater security for society. However, initial results of the application for the case studied highlight limitations of the technique, highlighting the effect of vegetation cover on the quality of interferometric pairs, expressed by the low coherence between the images. The study is ongoing and foresees the use of complementary techniques to mitigate this limitation in the next phase.

KEYWORDS: Interferometry, InSAR, Slope, Creep, Monitoring

1 INTRODUÇÃO

Faixa de dutos é uma área de terreno que abriga uma ou mais tubulações utilizadas para transportar fluidos, como petróleo, gás natural, água, produtos químicos, entre outros. Essas tubulações, também conhecidas como dutos, são instaladas geralmente abaixo da superfície do terreno.

As faixas de dutos são projetadas para garantir a segurança e a eficiência no transporte desses fluidos em longas distâncias. No Brasil, devido à vasta extensão territorial, essas obras podem ter centenas ou milhares

de quilômetros, atravessando áreas geograficamente diversas, como serras, rios, ambientes marinhos costeiros e regiões metropolitanas. Além disso, a diversidade geológica e geomorfológica encontrada nessas áreas implica em diferentes tipos de solos e condições hidrogeológicas, demandando projetos de engenharia variados para escavação, fundações e estabilização de taludes.

Estradas, linhas de transmissão, gasodutos, oleodutos etc., bem como outros tipos de obras de engenharia, podem ser ameaçadas por eventos naturais adversos como deslizamentos (termo usado no presente artigo para designar os movimentos de massa em encosta), inundações, erosões, terremotos, furacões, maremotos etc. Os desastres associados a tais eventos, podem ocasionar impactos ambientais consideráveis, gerar prejuízos financeiros de elevada monta, danos sociais e perdas de vidas humanas. No caso de dutos de transmissão (oleodutos, gasodutos, polidutos, aquedutos, etc), as falhas causadas por fenômenos naturais são menos frequentes, comparando-se com falhas relativas à corrosão e ações de terceiros, entretanto, merecem bastante consideração, tendo em vista que deslizamentos podem ocorrer em locais, onde as condições de acesso podem complicar as operações de contenção de vazamentos e ainda dificultar a estabilização do maciço afetado em curto prazo.

Diversos acidentes causados por problemas geotécnicos em dutos, principalmente escorregamentos com rompimento e vazamento, já foram relatados por Piccarelli et al. (2004), Soares et al. (2001), entre outros. Nestes casos, a preocupação é muito grande devido aos efeitos em cascata associado a exposição de dutos à ameaça de deslizamentos (Girgin et al., 2019; Zhang et al., 2020)

Ações preventivas são de suma importância para reduzir o perigo (*hazard*) associado ao evento geológico adverso, de forma a garantir a integridade das instalações e sua operação segura. Para isto sistemas de alerta são de suma importância para o monitoramento de parâmetros que indicam o grau de segurança quanto a ocorrência de deslizamentos.

Uma das técnicas em desenvolvimento que vem sendo utilizada para mapear e monitorar os movimentos de superfície é a tecnologia de imageamento por radar de abertura sintética (SAR). Esta técnica é denominada Interferometria Diferencial (DInSAR). Diante do seu caráter inovador, é importante a realização de estudos para avaliar a viabilidade do uso desta técnica para monitoramento de movimento de massa.

O presente trabalho visa contribuir para avaliar a aplicabilidade da técnica, tendo como estudo de caso uma encosta, no Estado da Bahia, que vem sofrendo rastejo tendo uma faixa de dutos ao seu pé. Foram utilizadas para o processamento DInSAR, imagens do programa Sentinel, que são fornecidas gratuitamente pela Agência Espacial Europeia (ESA). Após aquisição das imagens foi feito o seu processamento no programa de fonte aberta SNAP (Sentinel Application Platform), disponibilizado pela Agência Espacial Europeia. Finalmente, são apresentados os resultados da análise na área de estudo, visando discutir a aplicação da técnica DInSAR no monitoramento do referido talude pelo método adotado.

É importante frisar que este trabalho apresenta resultados iniciais e que o estudo encontra-se em desenvolvimento, devendo incorporar, nas fases seguintes, outras técnicas DInSAR para o processamento das imagens.

2 INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR (DInSAR)

O radar de abertura sintética, do inglês Synthetic Aperture Radar (SAR), é composto por um sensor ativo que é capaz de gerar sua própria energia eletromagnética na faixa das micro-ondas e, de acordo com Trevett (1986), consegue realizar medições da superfície terrestre em condições adversas do clima e até mesmo em regiões cobertas de nuvens. Sendo assim, SAR é um sistema de imageamento ativo e coerente, que envia a intervalos regulares pulsos de micro-ondas, e registra a parcela da intensidade da radiação retroespalhada pela superfície.

O funcionamento mais elementar de um sistema radar consiste na detecção e medida da distância entre o sensor e o alvo, a partir da determinação do tempo de atraso do sinal emitido. Em uma imagem SAR, o brilho (ou intensidade) de cada pixel é proporcional à potência do sinal de retorno recebido pela antena, que varia em função da interação entre os parâmetros do sistema, dos alvos e do sinal de retorno. Alves et al. (2023) cita que uma imagem SAR pode conter, além de informações topográficas, elementos de deslocamento da superfície terrestre. Sendo assim, cada pixel da imagem interferométrica está relacionado com a elevação do terreno, possibilitando com isso a geração de um modelo digital de elevação (MDE).

Uma medida importante da qualidade de um interferograma é a coerência interferométrica, que é um conceito chave na análise de imagens de radar de abertura sintética. Refere-se à consistência das ondas de

radar refletidas ao longo do tempo em uma determinada área. Quanto maior a coerência interferométrica, mais estáveis são as características da superfície observada. Em resumo, a coerência interferométrica é fundamental para extrair informações precisas sobre mudanças na superfície terrestre a partir de imagens de radar.

A interferometria SAR consiste em combinar duas imagens complexas adquiridas por sensores em posições ligeiramente distintas, o que permite derivar informações acerca da topografia de uma determinada região. Entretanto, se duas imagens SAR são adquiridas exatamente da mesma posição, mas em tempos distintos, qualquer mudança na posição de um alvo na superfície entre as aquisições será detectada. Na prática, no entanto, as plataformas orbitais não descrevem exatamente a mesma trajetória. Como consequência, a fase interferométrica irá sempre conter uma componente associada à topografia. A ideia básica da técnica de Interferometria SAR Diferencial (DInSAR - Differential SAR Interferometry), ou DInSAR clássica, é justamente isolar a componente relativa à deformação da componente topográfica, permitindo a detecção de deslocamento entre as aquisições de imagens SAR, como ilustrado na Figura 1. De modo simplificado, a técnica DInSAR explora a informação contida na fase de radar de, no mínimo, duas imagens complexas adquiridas em diferentes épocas, sobre uma mesma área e que formam um par interferométrico.

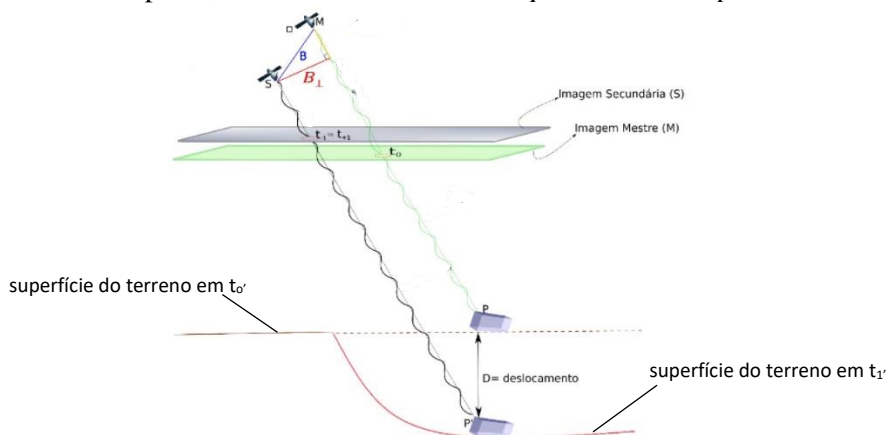


Figura 1: Exemplo simplificado de uma interferometria SAR ilustrando uma deformação do terreno ocorrida entre duas passagens de satélite. Fonte: Alves et al. (2023) – Modificado.

3 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DInSAR EM MONITORAMENTO DA MOVIMENTAÇÃO DE TALUDES

Vários trabalhos acerca de monitoramento de movimentação de taludes usando DInSAR vem sendo publicados recentemente. Na área de dutos, segundo O'neil e Samcheck (2002) foi realizado, em 2000, um estudo do Pipeline Research Committee International (PRCI) em uma faixa de dutos da TransCanada, empresa que opera mais de 38.000 quilômetros de dutos no Canadá. Este estudo comparou leituras convencionais de inclinômetros com a tecnologia DInSAR e comprovou a boa capacidade desta tecnologia para o monitoramento. A TransCanada começou, então, a usar a tecnologia DInSAR no seu programa de monitoramento nas encostas de Alberta. Viana et al. (2022) apresentam resultados da aplicação experimental, em parceria com Furnas Centrais Elétricas, da técnica DInSAR no monitoramento de deslocamentos da crista e do talude de jusante de uma barragem de terra e enrocamento com altura máxima de 75 metros e comprimento de crista de 358 metros, localizada no Estado de Minas Gerais, utilizando imagens do radar Sentinel-1.

A crescente disponibilidade de imagens de satélite SAR (em termos de cobertura espacial e temporal) e o desenvolvimento de algoritmos de processamento precisos levaram à oportunidade de utilizar tecnologias de satélite para aplicações de monitoramento de taludes, permitindo refletir sobre a possibilidade de explorar a técnica InSAR por satélite para fins de previsão de deslizamentos de terra.

No que diz respeito à aplicação de dados multitemporais DInSAR a estudos de deslizamentos, a literatura científica tem discutido amplamente os limites desta técnica, como por exemplo: a resolução temporal que pode limitar a análise em áreas onde as mudanças na superfície ocorrem rapidamente; a resolução espacial, que pode ser um problema para detectar deslizamentos em pequena escala ou para distinguir entre diferentes tipos de movimentos de massa; a interferência atmosférica, onde a presença de vapor d'água pode causar interferência nos sinais de radar, especialmente em regiões com vegetação densa ou com condições

atmosféricas variáveis; e, finalmente, a baixa coerência interferométrica, que pode ser causada por uma série de fatores como, mudanças sazonais na vegetação, cobertura de neve e interferência urbana.

De acordo com Youden et al. (2002), uma das grandes vantagens da técnica é a área de cobertura das imagens, que pode representar redução de custos de campanhas de campo tradicionais, tais como leituras de inclinômetros e marcos superficiais.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste artigo está localizada em uma faixa de dutos na Bahia (Figura 2).

Como pode ser observado, a área instável tem direção longitudinal aproximada SW-NE e, partindo da Faixa de Dutos, provavelmente se estende por mais de 100 m nesta direção. Os degraus que se observa no limite a montante da área são muros de arrimo em gabiões existentes. Em junho de 2020, através de inspeções no trecho estudado, foi observada uma elevada movimentação do terreno junto a Faixa de Dutos, com direção do movimento aproximadamente perpendicular a faixa.

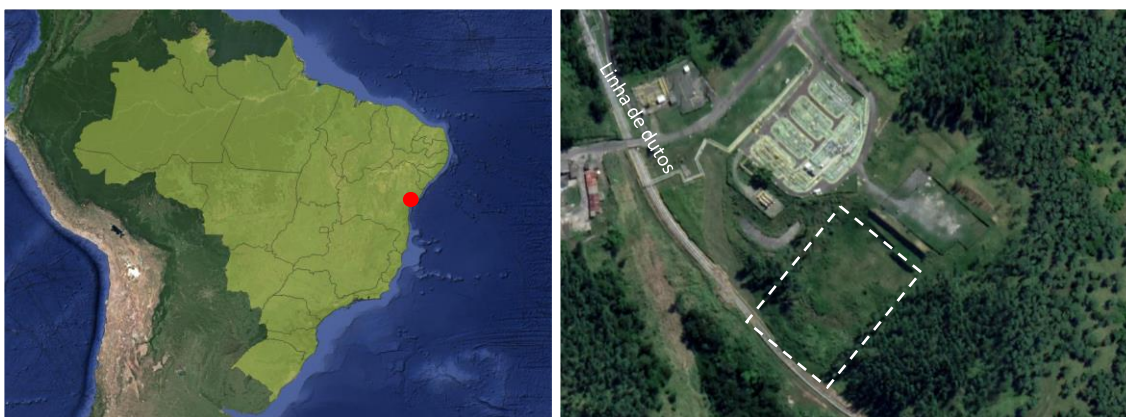


Figura 2: Localização aproximada no território nacional e vista aérea da área de estudo com indicação da área em rastejo atingindo a linha de dutos a jusante (retângulo tracejado).

Experiências anteriores na região mostram que rupturas de taludes naturais de pequena inclinação, são precedidas de processos de movimentação lenta da encosta (rastejo) tendo superfície de ruptura em camada superior do subsolo, constituída por material argiloso potencialmente expansivo resultante do intemperismo do maciço de folhelho subjacente, como é o caso do presente trabalho. O perfil geotécnico do terreno é apresentado na Figura 3. Destaca-se no perfil geotécnico um afloramento do nível d'água no talude, situação muito comum em casos de rastejo.

Com a interpretação das imagens aéreas e do perfil geotécnico do terreno, pôde-se confirmar as experiências anteriores na região em condições geotécnicas semelhantes, segundo as quais as instabilidades geotécnicas se manifestam com movimentos predominantemente lentos. Para tais situações o monitoramento de deslocamentos do terreno é muito importante para o controle de segurança geotécnica da encosta, corroborando com a relevância de se avaliar o uso da técnica DInSAR para tal fim.

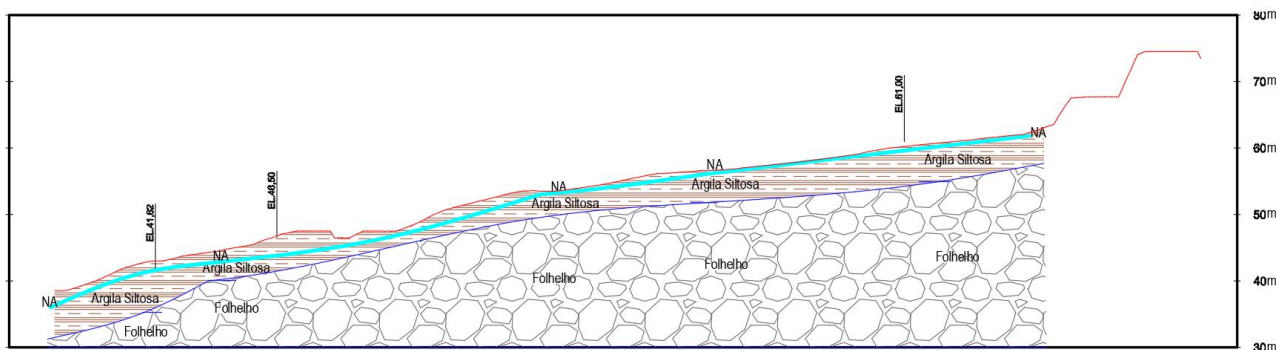


Figura 3: Perfil geotécnico da área de estudo. Fonte: Autor.

5 METODOLOGIA DE TRABALHO

A aplicação da técnica para a área de estudo seguir os passos descritos abaixo.

Primeiramente separaram-se 14 imagens SAR obtidas da Instalação de Satélite do Alasca (Alaska Satellite Facility - ASF). A ASF disponibiliza imagens de radar de diversos satélites e, conforme citado anteriormente, foi escolhida a utilização das imagens obtidas pelo programa Sentinel, da Agência Espacial Europeia, devido à facilidade de processar estas imagens em um software de código aberto (SNAP). Para escolha das imagens foi definido como período de análise os meses de Junho de 2019 a Junho de 2020 com objetivo de realizar a avaliação dos 12 meses anteriores a constatação, a partir de inspeções visuais, do movimento do maciço. O trabalho se ateve ao programa Sentinel 1, cujo satélite possui órbita polar e um ciclo de 12 dias e 175 órbitas por ciclo. Seus sensores têm capacidade de operar em modos de dupla polarização HH/HV ou VV/VH e polarização única HH ou VV.

Foi utilizado para análise das imagens SAR o programa de código aberto SNAP (Sentinel Application Platform). Este software consiste em uma coleção de ferramentas de processamento, leitores e gravadores de produtos Sentinel e de outras missões SAR, como ERS-1 e 2, ENVISAT, TerraSAR-X, dentre outros. A versão utilizada foi a 8.0.

O processamento interferométrico foi inicialmente feito em uma única etapa cujo objetivo foi calcular a coerência interferométrica entre os pares de imagem. Para processamento das imagens foram utilizadas duas imagens mestre para cada ano avaliado, uma para o ano de 2019 e outra para o ano de 2020. As demais imagens foram consideradas escravas, produzindo-se um total de 12 pares interferométricos.

Para a verificação da viabilidade técnica do uso da técnica de DInSAR, o presente trabalho adotou como critério a coerência interferométrica dos pixels, por ser o indicador de qualidade do interferograma. Vários autores têm analisado a viabilidade da interferometria diferencial clássica (DInSAR) em função da coerência. Fárová et al. (2019) cita que a técnica DInSAR clássica só funciona corretamente em áreas onde os interferogramas gerados são caracterizados por alta coerência, pois um valor de coerência insuficiente causa valores de diferença de fase não confiáveis. O Canada Center for Remote Sensing CCRS (1999) apresenta valores de coerência a serem considerados para avaliação da qualidade do interferograma (Tabela 1).

Tabela 1: Relação entre coerência e qualidade do interferograma.

Coerência interferométrica	Qualidade do interferograma
0,0 – 0,3	baixa
0,3 – 0,5	moderada
0,5 – 0,7	boa
0,7 – 1,0	excelente

Fonte: CCRS, 1999.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram selecionados uma série de pontos localizados no talude em análise e em suas imediações, indicados na Figura 4 como referências para a avaliação da coerência dos pares interferométricos e cálculo dos deslocamentos. O objetivo de ampliar a área de análise foi poder promover um comparativo entre coerências no talude propriamente dito e em área contíguas. Os resultados da estimativa de coerência estão apresentados na Figura 5.

Segundo a literatura, entre as superfícies de terreno típicas com baixa coerência estão as áreas com vegetação densa. Além disso, mudanças na umidade próxima à superfície também podem causar perdas de coerência. Singhroy (2002) apud Maccardle et al. (2005) menciona a falta de coerência como principal fator que limita o monitoramento interferométrico, particularmente em regiões úmidas com muita vegetação.

Observa-se que a principal região que é o foco deste estudo, ou seja, o talude em rastejo (vide Figura 4), não apresenta, de uma maneira geral, boa coerência. Tal resultado pode ser devido a presença de vegetação e à umidade junto a superfície do solo, posto que se observou surgência de água na metade superior do talude (Figura 3). O nível d'água elevado pode ter deixado a massa de solo com teor de umidade suficiente para diminuir o nível de correlação dos sinais entre as duas imagens SAR. Por outro lado, os locais sem a presença de vegetação e com um certo grau de urbanização (cobertura em concreto) apresentou alta coerência indicando qualidades dos interferograma de boa a excelente.



Figura 4: Pontos para avaliação da coerência interferométrica, com indicação da área em rastejo (retângulo tracejado).

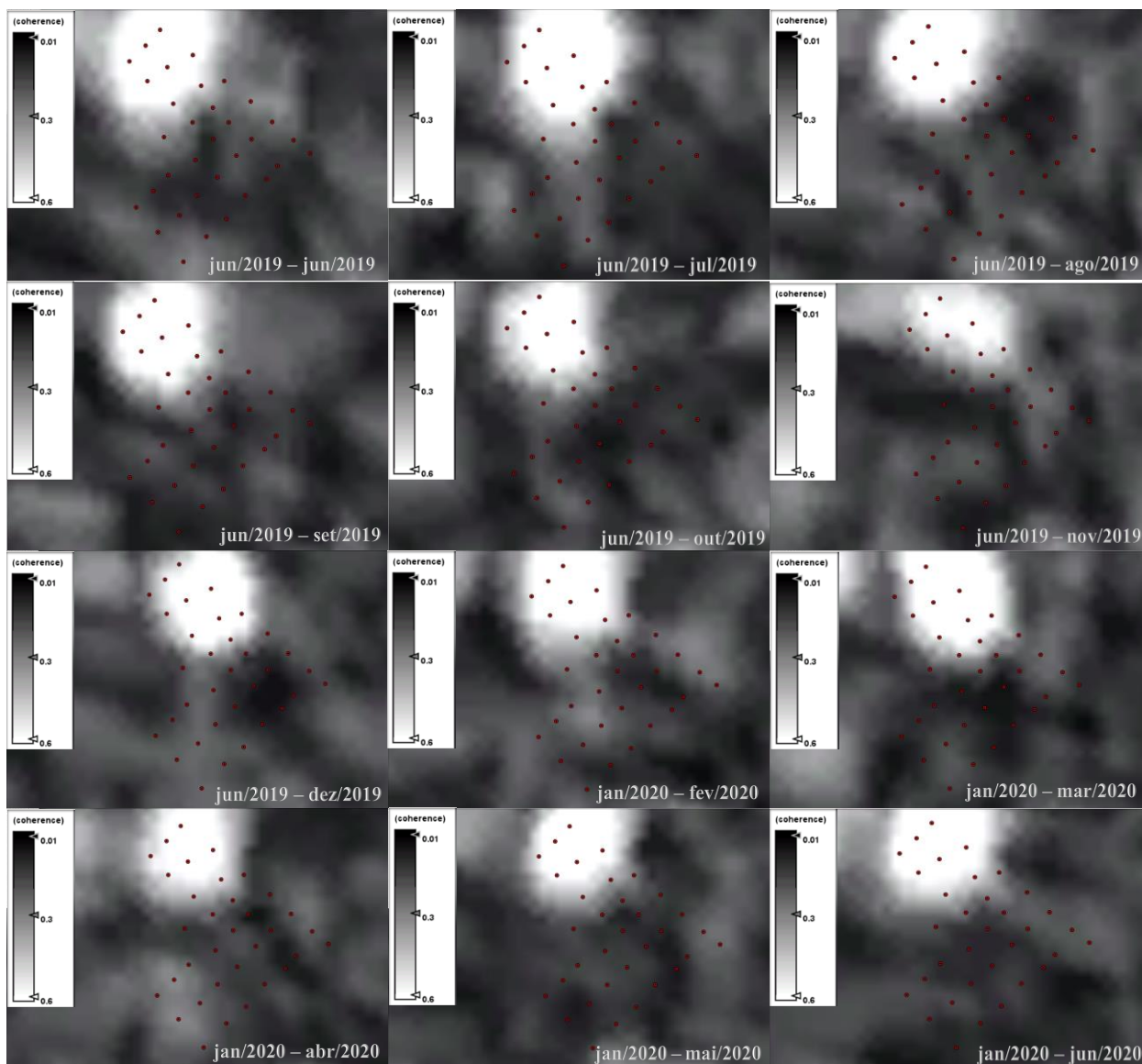


Figura 5: Resultado matricial da coerência no período de Jun/2019 a Jun/2020. Fonte: Autor.

Apesar da baixa coerência, decidiu-se por processar os deslocamentos para dois pares de imagem, jun/2019-dez/2019 e jan/2020-maio/2020. Entretanto, diante da baixa coerência das imagens, optou-se por não apresentar tais resultados no presente trabalho, necessitando de uma investigação mais detalhada, demandando a análise de uma quantidade adicional de imagens, que será objeto de estudo de um futuro trabalho.

Autores (ex: Glaser et al., 2002; Kajuna et al., 2011; Walter et al., 2011) citam a problemática da baixa coerência por afetarem a confiabilidade dos dados de deslocamento obtidos pelas técnicas DInSAR clássicas, principalmente, em área afetadas por mudanças sazonais, vegetação densa ou processos de deformação complexos. Eles propõem o uso de métodos para otimizar a coerência de forma a melhorar a qualidade dos resultados.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Procurou-se apresentar no trabalho a aplicabilidade da técnica DInSAR clássica para o monitoramento de deslocamentos em um talude. Os resultados indicaram uma clara influência da cobertura do terreno na coerência dos pares interferométricos. O trecho de maior interesse do presente estudo, caracterizado pela região do processo de rastejo apresentou baixa coerência devido, provavelmente, à presença de vegetação, mesmo sendo rasteira, e à umidade elevada junto a superfície do terreno, prejudicando a utilização da técnica para o cálculo dos deslocamentos. Quando a coerência é baixa, as medidas de deslocamento da superfície podem não ser confiáveis.

Devido à baixa coerência dos interferogramas obtidos pela técnica DInSAR clássica para a área de interesse, pretende-se avaliar em futuras etapas da presente pesquisa o uso da técnica PSI (Persistent Scatterer Interferometry), que, ao selecionar alvos de melhor coerência na imagem analisada, tem se mostrado adequada para regiões com deficiência de correlação atmosférica, temporal e espacial, conforme evidenciado por Crosetto, et al. (2005).

8 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio ao desenvolvimento da presente pesquisa.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, S. C., Krueger, C. P., Dalazoana, D. (2023). Técnica PSInSAR na Avaliação de Deslocamentos: Uma Análise Conceitual, Aplicações e Perspectivas. *Revista Brasileira de Cartografia*. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. Vol. 75.
- CCRS, (COMM). (1999). *Fundamentals of Remote Sensing. A Canada Centre for Remote Sensing Tutorial*.
- Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O., Agudo, M., Fernández, P. (2005). Land Deformation Monitoring Using SAR Interferometry: State-Of-The-Art. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* (6).
- Fárová, K., Jelének, J., Kopacková-strnadová, V., Kycl, P. (2019). Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovicky Landslide, Czech Republic. *Remote Sens.*, 11, 2670. <https://doi.org/10.3390/rs11222670>
- Girgin, S.; Necci, A., Krausmann, E. (2019). Dealing with cascading multi-hazard risks in national risk assessment: The case of Natech accidents. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 35. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101072>
- Glaser S. H., Bürgmann, R., Zebker, H. A. (2002). InSAR coherence analysis and estimation of hydrogeological parameters in a tectonically active region: Mammoth Lakes Basin, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Volume 107.

- Kajuna, P. M. M., Park H., Kim, S. W., Choi, J. H. (2011). Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) coherence analysis and integration with optical data for land-cover classification mapping in Tanzania. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 32.
- Maccardle, A. et al. (2005). Pipeline Monitoring With Interferometry in Non-Arid Region. In: *Rio Pipeline Conference & Exposition, 2005, Rio de Janeiro. Proceedings*. Brazil. CD-ROM.
- Viana, D. R., Mendonça, M. B., Silva, W. B., Rocha, C. H. O. (2022). Aplicação da interferometria por Radar de Abertura Sintética (SAR) Sentinel-1 no monitoramento de taludes de uma barragem In: *VIII Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas (VIII COBRAE)*, Porto de Galinhas.
- O'Neil, G. Samchek, A. Satellite-based monitoring of slope movements on Transcanada's Pipeline System. (2002). In: *4th International pipeline conference, Calgary. Proceedings*. Canadá: CD-ROM.
- Picarelli, L., Mandolini, A., Giusti, G. (2004). Interaction between slow active landslides and pipelines. *Ninth International Symposium on Landslides. Workshop on Landslides and lifelines – submarine landslides affecting pipelines and lifelines in slow moving slides in areas prone to debris flow events*. CD-ROM.
- Soares, J., Musman, J. V. R. (2001). Estabilização e Monitoramento de Encosta em Solo Coluvionar na Serra do Mar. In: *III Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas. Anais...* Rio de Janeiro: Perfect Press, p.571-577.
- Trevett, J. W. (1986). *Imaging Radar for Resources Surveys*. New York: Chapman&Hall.
- Younden, J. et al. (2002). Satellite-based monitoring of subsidence ground movement impacting pipeline integrity. In: *4th International pipeline conference, Calgary. Proceedings*. Canadá: ASME.
- Zhang, S.; Xu, D.; Shen, G.; Liu, J.; Yang, L. (2020). Numerical Simulation of Na-Tech Cascading Disasters in a Large Oil Depot. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 8620. Disponível em <<https://doi.org/10.3390/ijerph17228620>>. Acesso em: 15 mar. 2024
- Walter, T. R., Parolai, S., Wang, R. (2011). *Coherence optimization in multi-temporal InSAR time series analysis: an application to the Maule earthquake in Chile*. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115.