

MONITORIZAÇÃO DE OBRAS GEOTÉCNICAS COM TÉCNICAS BASEADAS EM SATÉLITES

Paulo Barreto¹, Luís Silva², Ricardo Cabral³, Martino Correia³, Steffan Davies³, Tiago Cordeiro³

¹ Egis Road Operation Portugal, Rua Dominguez Alvarez, 44, escritório 2.8 - 4150-801 Porto, Portugal

email: paulo.barreto@egisportugal.pt <http://www.egisportugal.pt>

² Egis Road Operation Portugal, Rua Dominguez Alvarez, 44, escritório 2.8 - 4150-801 Porto, Portugal

³ Spotlite, Rua Pedro Nunes, Edifício C, Escritório 2.25, 3030-199 Coimbra, Portugal

Sumário

A realização de inspeções e monitorizações a estruturas geotécnicas rodoviárias, permite caraterizar o seu estado de conservação e estabilidade durante o ciclo de vida. Contudo, podem implicar a existência de equipamentos no terreno, estando limitadas a locais previamente definidos bem como a determinadas periodicidades de recolha de dados, funcionando muitas vezes através da comparação de resultados face à data de instalação. Neste documento é apresentada a aplicação de um sistema de monitorização baseado em satélites, mais especificamente Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), que poderá ser a solução para uma análise mais alargada, periodicidades mais reduzidas e analisar movimentos que tenham ocorrido no passado.

Palavras-chave: Gestão de ativos; Estruturas geotécnicas; Monitorização; Satélites

1 INTRODUÇÃO

A realização de inspeções visuais periódicas aos diferentes ativos rodoviários, que permitam caraterizar o seu estado de conservação, identificando eventuais anomalias existentes e trabalhos necessários para a sua resolução, durante o seu ciclo de vida, é cada vez mais relevante para garantir um adequado desempenho das infraestruturas, nomeadamente estruturas geotécnicas.

A Egis Road Operation Portugal (EROP) é responsável pela operação e manutenção da autoestrada A24, autoestrada que percorre montanhas e vales, incluindo o Douro Vinhateiro. Deste modo, foram adotadas diversas soluções de engenharia para superar o relevo existente, existindo diversas estruturas geotécnicas, nomeadamente 145 muros de suporte das mais variadas tipologias, incluindo diversas estruturas de grandes dimensões, bem como imponentes taludes, muitos destes com pregagens, redes de contenção e revestimentos de betão projetado. A necessidade de realizar uma gestão e acompanhamento adequados ao longo do ciclo de vida destes importantes ativos, levou a que fosse desenvolvido um sistema misto assente na realização de inspeções visuais periódicas e de monitorização de diversos tipos, nomeadamente topográficas e inclinométricas.

Contudo, estas monitorizações implicam a existência de equipamentos no terreno, estando limitadas a locais previamente definidos bem como a determinadas periodicidades de recolha de dados, funcionando muito vezes através da comparação de resultados face à data de instalação. Assim, será relevante encontrar métodos que permitam uma análise mais alargada, periodicidades mais reduzidas e simultaneamente permitam analisar movimentos que tenham ocorrido anteriormente à instalação dos sistemas de monitorização. Neste contexto, ao longo deste documento será apresentada a aplicação de um sistema de monitorização baseado em satélites, mais especificamente *Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)*, cuja implementação poderá permitir uma análise espacial muito mais alargada com periodicidades reduzidas e que permitam inclusive uma análise de dados do passado. Esta metodologia poderá permitir a deteção precoce de eventuais instabilizações, incluindo em zonas que não dispõem de instrumentação local.

2 A MISSÃO COPERNICUS

A União Europeia, reconhecendo o potencial e a importância de manter um programa espacial de observação da Terra, lançou em 2014 o programa Copernicus, sucessor do anterior programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) de 2010. O programa Copernicus, tutelado pela Comissão Europeia, e gerido por uma parceria entre a EUSPA (*EU Agency for the Space Programme*) e a ESA (*European Space Agency*), é composto por um conjunto de missões de observação terrestre, que visam adquirir, processar e fornecer informação de variada natureza e fornecer ao público e às empresas um acesso livre e aberto aos seus produtos. As missões do programa Copernicus desenvolvidas pela ESA, chamadas Sentinel, são compostas por várias sub-missões, cada uma correspondente a um objetivo específico, e que daí faz recurso a um satélite ou constelação de satélites com o equipamento necessário para satisfazer as necessidades da sua missão. Os avanços na tecnologia espacial SAR (*Synthetic Aperture Radar*) tem permitido um aumento significativo na qualidade e precisão dos dados, seja através de um aumento das capacidades dos sensores (resolução e instrumentação), como através do aumento do volume dos dados e a sua periodicidade [1].

Para a abordagem descrita neste artigo, dá-se especial importância à missão Sentinel-1, cujo objetivo é o de fornecer imagens de radar da superfície terrestre e dos oceanos, independentemente da hora do dia ou das condições atmosféricas. O programa Sentinel-1 é a primeira missão interna do projeto Copernicus, e inicia-se em abril de 2014 com o lançamento do satélite Sentinel-1A, que terá sido reforçado mais tarde em abril de 2016 com o lançamento do satélite gémeo Sentinel-1B, tornando-se assim uma constelação. Esta constelação é constituída por quatro satélites idênticos, dois dos quais já foram lançados (S-1A em 2014 e S-1B em 2017) e outros dois com lançamento planeado nos próximos anos (S-1C em 2023 e S-1D numa data posterior ainda por definir). Cada um destes satélites é colocado numa órbita heliossíncrona, mantendo o mesmo ângulo de iluminação da superfície a cada passagem. O período de revisita de cada satélite é, para o território europeu, de doze dias, sendo que a posição na órbita para cada satélite é deliberadamente espaçada, de forma a encurtar o período de revisita da constelação (S-1A e S-1B, em conjunto, fornecem um período de revisita de seis dias na Europa, por exemplo). Os satélites Sentinel-1 comportam a bordo um sistema de radar do tipo SAR, constituído por um conjunto de instrumentos, incluindo um emissor e um recetor, que permitem a criação de imagens da superfície terrestre de forma ativa (independente de outras fontes de luz), ao contrário de outras missões como o Sentinel-2 que, por serem sensores passivos, dependem da luz solar. A tecnologia de radar a bordo dos sistemas Sentinel-1 opera na banda eletromagnética de faixa C (4 – 8 GHz ou 7.5 – 3.75 cm), permitindo uma resolução máxima de 5 metros por pixel. As imagens obtidas pelo Sentinel-1 podem variar na sua geometria de aquisição, consoante a órbita em que o satélite se encontra no momento - ascendente ou descendente. Como a imagem é gerada de acordo com a perspetiva do sensor (*line-of-sight*), a utilização de diferentes órbitas permite uma mudança na geometria de iluminação da superfície, que pode ser relevante em zonas de estudo com elevação acentuada causada por elementos topográficos ou antrópicos. Por outro lado, ao fazer análise de subsidência, é possível combinar as duas perspetivas de forma a extrair o valor vertical de subsidência ao invés do valor em relação à perspetiva do satélite.

3 METODOLOGIAS

A análise de subsidência através de SAR baseia-se em técnicas de interferometria, que envolvem a sobreposição da componente de fase de um par de imagens de Radar, de forma a gerar uma nova imagem que representa a interferência das ondas das duas aquisições. Estas imagens devem estar separadas no tempo ou no espaço [2], de forma a gerar nova informação acerca das diferenças na componente de fase da onda eletromagnética entre dois períodos de tempo ou duas perspetivas distintas. As diferenças geométricas entre aquisições, que contribuem diretamente às diferenças no valor da fase, são eliminadas através de correções feitas a partir da determinação da posição exata do satélite na sua órbita.

Às técnicas mais simples de interferometria, dá-se o nome de DInSAR (*Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar*), que são aplicadas frequentemente a fenómenos geológicos tais como sismos e atividade vulcânica, apresentando grandes diferenças de fase entre duas aquisições em larga escala. Um dos fatores limitativos do DInSAR é a sua incapacidade de distinguir entre efeitos atmosféricos que contribuem para alterações na fase da onda e o movimento real da superfície. No entanto, quando se consegue determinar que uma componente significativa da diferença entre duas aquisições deriva de movimento à superfície, a contribuição atmosférica é considerada insignificante. O DInSAR também é usado há décadas para a criação de DEMs (*Digital Elevation*

Models), representações topográficas digitais, como é o caso do primeiro modelo completo da superfície da Terra, ainda utilizado hoje para o processamento de dados de SAR - o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) [3].

Para analisar ligeiras deformações da superfície ao longo do tempo, foram sendo desenvolvidas diferentes abordagens pertencentes a uma família de técnicas chamada *Interferometric Stacking* ou MTInSAR (*Multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar*). Estas metodologias envolvem a criação de um conjunto de interferogramas para uma determinada zona de análise, de forma a compreender a evolução da fase dos píxeis ao longo do tempo. Ao trabalhar com um número significativo de interferogramas (aproximadamente 20 ou mais por análise), é possível remover ou minimizar as contribuições atmosféricas para o sinal, e isolar melhor a contribuição para as diferenças de fase causadas por movimento real da superfície.

Existem atualmente várias técnicas que tentam dar resposta à necessidade de avaliar movimentos ligeiros da superfície, mas podem-se identificar duas das mais utilizadas, que diferem entre si em vários aspetos importantes - PSInSAR (*Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*) e SBAS (*Small Baseline Subset*).

PSInSAR é uma técnica que, através de um conjunto de interferogramas gerados a partir de imagens de Radar com uma mesma geometria de aquisição, identifica alvos coerentes (com grande estabilidade nas suas propriedades ao longo do tempo) que são visíveis em todas as aquisições, dando-se o nome de Refletores Permanentes (PS - *Permanent Scatterers*). Estes PS, devido à sua alta estabilidade diacrónica, servem de referência para a filtragem de contribuições atmosféricas para a fase. O PSInSAR, devido à sua dependência em PS, tem boa aplicabilidade em ambientes urbanos, onde é possível identificar uma alta densidade de refletores estáveis. No entanto, torna-se muito limitado quando aplicado a zonas rurais devido à fraca densidade de PS. Baseia-se num modelo de ligação de interferogramas *single-master*, onde todos os interferogramas são criados a partir de imagens *slave* em relação a uma imagem de referência *master*, normalmente situado cronologicamente perto do centro da pilha de interferogramas. Isto significa que o número de interferogramas gerados para a análise é sempre N-1, onde N é o número de imagens utilizadas na análise.

O SBAS é uma técnica alternativa com diferenças significativas em relação à técnica anterior. Baseia-se num modelo de ligação de interferogramas *multi-master*, onde são selecionadas várias imagens de referência *master* para um conjunto de imagens *slaves*, que são escolhidos consoante um número de parâmetros como a distância cronológica ou física entre as aquisições (por exemplo 48 dias e 200 metros). Isto leva à criação de um número várias vezes maior de interferogramas do que no caso da técnica PSInSAR para um mesmo caso de estudo, contribuindo para um aumento significativo do tempo de processamento e das necessidades de armazenamento dos dados intermédios. Este emparelhamento em parcelas cronológicas e com limites na distância entre o sensor possibilita a minimização dos efeitos de descorrelação entre interferogramas devido a efeitos atmosféricos, do crescimento de vegetação ou de alterações físicas graduais na zona de estudo. Assim, a principal vantagem do SBAS em relação ao PSInSAR é a sua capacidade de identificar pontos de estabilidade aceitável em zonas rurais (Fig. 1), permitindo muito mais flexibilidade na seleção de zonas de estudo. Ao contrário do PSInSAR, cujos píxeis identificam refletores dominantes existentes na sua zona de ocupação, no SBAS os píxeis são representados por refletores distribuídos na sua área chamados DS (*Distributed Scatterers*) [4], permitindo uma maior densidade de pontos fora das zonas urbanas.



Fig. 1. Técnica SBAS aplicada à A24, com zonas de subsidência grave representadas por pontos a vermelho

4 ESTADO DA ARTE

Desde o lançamento da missão Sentinel-1 no ano de 2014, têm sido publicados vários estudos com o objetivo de averiguar as capacidades do SAR espacial de média resolução como ferramenta de monitorização de infraestruturas, recorrendo a técnicas de interferometria. Aqui será feita uma breve descrição de alguns estudos recentes que lidam com o potencial de InSAR e do Sentinel-1 para monitorização de infraestruturas:

4.1 Ponte de Morandi

Em 2019 é publicado um estudo [1] que procura identificar deformações na ponte de Morandi que tenham ocorrido antes da sua falha crítica, recorrendo a 15 anos de produtos SAR obtidos de vários instrumentos (Envisat, Cosmo-SkyMed e Sentinel-1A/B). Os resultados deste estudo mostram que foi possível identificar comportamentos de deformação atípicas em secções da estrutura que terão começado em 2015, três anos antes do colapso. Por outro lado, os autores reconhecem a capacidade das novas plataformas SAR em medir processos de deformação à escala milimétrica.

4.2 Ponte de Viena

Um estudo publicado em 2020 [5] faz uma análise compreensiva de séries-temporais de deformação de uma ponte de betão em Viena. O estudo da ponte é integrado numa análise PSInSAR mais extensa da cidade de Viena que abrange um período de 3 anos (2016-2019), e os resultados são validados através de medições *in situ* efetuadas ao longo do tempo. Nesta análise, é aplicada uma série de passos às séries-temporais para melhoramento dos resultados, como também uma decomposição horizontal e vertical do movimento da ponte. Os autores consideram a abordagem viável e os resultados excedem as expectativas tanto em termos de qualidade como em precisão, e salientam a necessidade de se desenvolver mais estudos na área.

4.3 Rodovia da Zona Metropolitana de Roma

Publicado em 2020, este estudo [6] avalia o potencial de técnicas de InSAR Multi-Temporais para a gestão e monitorização de infraestruturas urbanas, nomeadamente de rodovias metropolitanas. Neste estudo recorre-se às técnicas de PSInSAR e SBAS, para os sistemas Sentinel-1 e Cosmo-SkyMed, respetivamente. Os dados de Sentinel-1A abrangem 3 anos (2015 a 2018) enquanto os dados do Cosmo-SkyMed abrangem quase seis anos (2011 a 2017). Foram identificadas zonas de subsidência, especialmente na proximidade de depósitos de aluvião. Os autores reconhecem as capacidades dos satélites SAR para efetuar análises abrangentes e de pormenor através das técnicas de MTInSAR, de forma a facilitar a gestão e manutenção de infraestruturas rodoviárias, e definir prioridades de intervenção de uma forma económica.

4.4 Estudo comparativo MTInSAR vs. GNSS no México

No ano de 2021 é publicado um estudo [7] que analisa a precisão das técnicas de PSInSAR e SBAS quando comparadas com dados GNSS e níveis geodésicos no México. O período de análise foi de 2 anos, de forma a haver sobreposição temporal com as medições *in situ*. Os resultados mostram um bom acordo entre as medições de satélite e as medições *in situ*, com diferenças nas estimativas médias de velocidade abaixo de 1 cm/ano quando comparado com GNSS e 8 mm/ano quando comparado com nivelamento geodésico. Daí, conclui-se que os dados de InSAR podem ser aplicados para além da comunidade científica, de forma a servirem instituições e auxiliar nas redes de monitorização existentes.

5 CASO DE ESTUDO: EGIS ROAD OPERATION PORTUGAL

De forma a avaliar o potencial de InSAR para a gestão da infraestrutura rodoviária em Portugal, foi elaborado um estudo piloto, que compreende uma análise abrangente de toda a extensão da autoestrada A24, e uma posterior análise em pormenor de uma zona crítica onde se sabe ter ocorrido um deslizamento (Fig. 2).

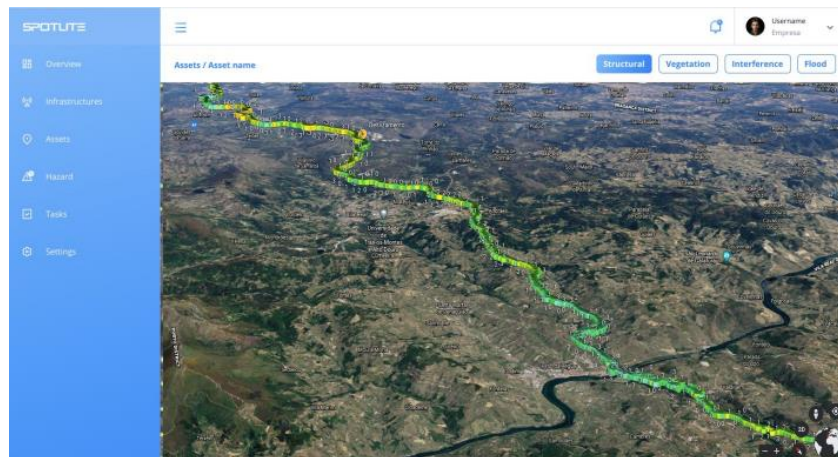


Fig. 2. Vista geral da A24 na plataforma Spotlite, ilustrando a extensão da análise possível pela tecnologia de satélite.

Para este estudo, fez-se recurso aos dados abertos do Sentinel-1, pois a sua periodicidade, aliada à sua cobertura completa do território português, permitiu uma análise em larga escala de toda a infraestrutura rodoviária em questão. Ambos os casos analisados compreendem um período de observação de 1 ano (2018-2019), de forma a obter estimativas da média anual de velocidade dos pontos alvo. Assim, foi utilizada a técnica de SBAS, pela sua capacidade em fornecer um número significativo de pontos de medição, mesmo em ambientes não urbanos, garantindo a viabilidade de obter medições em toda a extensão da rodovia. Para o processamento, foram utilizados os softwares de fonte-aberta GMTSAR e StaMPS, em ambiente Linux. O GMTSAR é um software, baseado no GMT (*Generic Mapping Tools*), que fornece um leque de ferramentas de manipulação geográfica e interferométrica especialmente adaptadas para o processamento de imagens de satélite SAR. Este software é responsável pela criação de interferogramas que são utilizados posteriormente na criação de pontos de medição.

Os *outputs* do GMTSAR são posteriormente estruturados de forma a serem compatíveis com o StaMPS, um pacote de software baseado no ambiente Matlab, responsável pela seleção e filtragem de pontos candidatos, cálculo de velocidades e a estimativa e remoção de contributos atmosféricos e orbitais nos resultados finais. O StaMPS exporta estes resultados em formato KML e CSV, para visualização no Google Earth ou integração numa plataforma ou ambiente GIS (Geographical Information System). As séries-temporais em formato CSV são importadas para o QGIS, um software GIS de código-aberto, de forma a fazer o corte dos pontos de medição, pois apenas aqueles dentro ou na proximidade da infraestrutura é que serão de interesse. Para este passo, foi criada uma zona de afetação da via (*buffer*). Para a análise geral da A24, foram obtidos mais de 100.000 pontos ao longo de 157 km de autoestrada (Fig. 3). Nesta extensão de via, foram identificadas onze áreas com deslocação cumulativa entre 2 e 5 cm, e que por este motivo exigem especial atenção, validação e acompanhamento por equipas *in situ*.



Fig. 3. Exemplo da densidade de pontos de medição possíveis através da técnica de SBAS

A análise de pormenor focou-se no PK 58 da A24, que se sabe ter sido afetado por um deslizamento num talude do lado poente da via, e que terá sido previamente salientada na análise geral, devido à presença de medições com velocidade máxima de 2 cm/ano. A zona do talude compreende acima de 80 pontos de medição, com um intervalo de 12 dias entre medições ao longo de um ano, resultando em 32 medições na série-temporal de cada ponto. A zona do talude com maior instabilidade localiza-se na zona Sul, que coincide com o local do deslizamento. Mais concretamente, foram identificados 3 pontos com elevada velocidade nas 2 medições anteriores ao evento (Fig. 4).

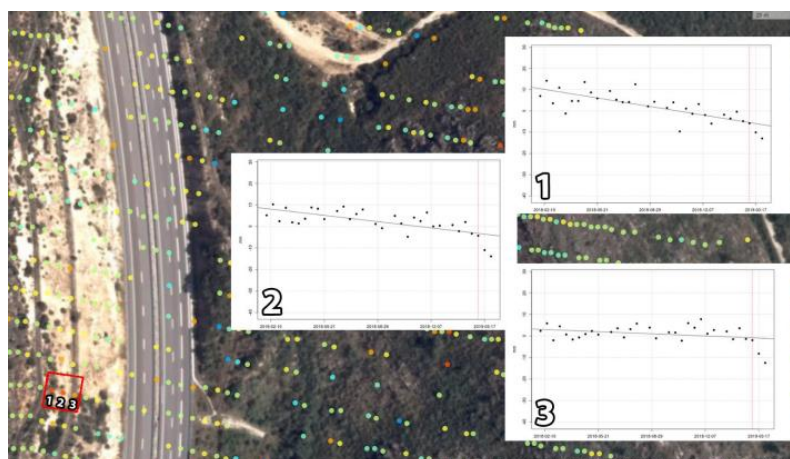


Fig. 4. Os três pontos do talude do PK 58 onde foi identificada uma aceleração imediatamente antes do deslizamento.

Para a apresentação dos dados recolhidos, é utilizada uma plataforma denominada de Spotlite, que será de seguida apresentada.

6 PLATAFORMA SPOTLITE

Spotlite é uma plataforma de gestão desenvolvida em Portugal, que tem como objetivo possibilitar uma monitorização multirrisco de infraestruturas. Permite identificar riscos de diversos tipos, desde subsidência, interferência de terceiros, mapeamento e previsão de cheias, bem como problemas relacionados com a aproximação da vegetação à infraestrutura. Inclui também ferramentas de auxílio na visualização digital de estruturas e os dados de análise que têm associados, com recurso à tecnologia de Digital Twins, sem necessidade de instalação de software. Adicionalmente, a plataforma permite a gestão de dados de campo relacionados com infraestruturas, incluindo as suas características específicas, fotografias ou imagens associadas, áreas de interesse e a associação de documentos e/ou ficheiros.

Cada área de utilizador da plataforma está associada a um *login* único encriptado, de forma a garantir a segurança dos dados, mas, no entanto, é possível fazer a gestão de equipas na plataforma, de modo a partilhar informações e delegar ações a outros membros de uma equipa. A integração de resultados de MTInSAR na Spotlite é feito através de dados formatados em formato CSV ou JSON, que podem ser posteriormente resgatados para criação de cópias de segurança ou análise. Os dados MTInSAR são apresentados com diversas opções de visualização e filtragem de informação, de forma permitir a análise e interpretação de grandes conjuntos de dados complexos de forma rápida e cómoda. Estes recursos de Sistemas de Informação Geográfica e *Big Data* incluem funcionalidades de comparação de séries temporais, ferramentas de operações geográficas, um sistema preditivo que indica a data em que se estima que os limites de segurança serão ultrapassados e sistemas de alertas para áreas críticas da infraestrutura.

7 CONCLUSÕES

A aplicação da técnica SBAS à extensão completa da autoestrada A24 permitiu que fossem identificadas várias instâncias de deslocamento à superfície. Uma análise posterior em pormenor a uma destas situações, que se sabe ter sido afetado por um deslizamento, levou à identificação de uma área de rápida aceleração, que depois se veio

a confirmar ter correspondido à zona do acidente. As medições neste local apresentam um comportamento anormal de aceleração nas duas medições anteriores ao evento, correspondendo a 24 dias de antecedência.

A habilidade dos sistemas espaciais SAR em providenciar observações com alta frequência temporal pode fornecer um importante contributo aos processos de monitorização. Por outro lado, os dados Sentinel-1, disponíveis em aberto, viabilizam uma abordagem deste género a relativamente baixo custo, comparativamente aos métodos tradicionais. A cobertura completa do Sentinel-1 pode permitir uma análise periódica em todo o território nacional, que aliada a um sistema automatizado de geração de alertas, pode aumentar a eficácia e produtividade dos trabalhos de gestão de infraestruturas.

8 REFERÊNCIAS

1. El Kamali, M., Abuelgasim, A., Papoutsis, I., Loupasakis, C., & Kontoes, C. (2020). A reasoned bibliography on SAR interferometry applications and outlook on big interferometric data processing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100358.
2. Orellana, F., Delgado Blasco, J. M., Fomelis, M., D'Aranno, P. J., Marsella, M. A., & Di Mascio, P. (2020). DInSAR for Road Infrastructure Monitoring: Case Study Highway Network of Rome Metropolitan (Italy). *Remote Sensing*, 12(22), 3697.
3. Cigna, F., Esquivel Ramírez, R., & Tapete, D. (2021). Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. *Remote Sensing*, 13(23), 4800.
4. Milillo P, Giardina G, Perissin D, Milillo G, Coletta A, Terranova C. Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*. 2019; 11(12):1403. <https://doi.org/10.3390/rs11121403>
5. Werner, M. (2001). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Mission Overview. *Frequenz*, 55(3-4), 75-79. <https://doi.org/10.1515/FREQ.2001.55.3-4.75>
6. Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517, 1–13. doi:10.1016/j.tecto.2011.10.013
7. Schlögl, M., Widhalm, B., & Avian, M. (2021). Comprehensive time-series analysis of bridge deformation using differential satellite radar interferometry based on Sentinel-1. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 172, 132-146.