



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JAILSON SILVA ALVES

**ANÁLISE DA INTERFEROMETRIA SAR NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO:
POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**

Recife

2023

JAILSON SILVA ALVES

**ANÁLISE DA INTERFEROMETRIA SAR NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO:
POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

A474a Alves, Jailson Silva.
Análise da interferometria SAR no monitoramento geotécnico:
potencialidades e limitações / Jailson Silva Alves. 2023.
160 f: il.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. InSAR. 3. Monitoramento. 4. Geotecnia. 5.
Taludes. 6. Subsistência. 7. Barragem. I. Coutinho, Roberto Quental
(Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG / 2023 - 47

JAILSON SILVA ALVES

**ANÁLISE DA INTERFEROMETRIA SAR NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO:
POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**

Dissertação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Geotecnia.

Aprovada em: 23/02/2023.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho - Universidade Federal de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes, (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Wendson de Oliveira Souza, (Examinador Externo)

Universidade Federal do Piauí

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Saul Barbosa Guedes, (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus avós, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, razão primeira de todas as coisas, Senhor do tempo e maestro da minha vida. Por toda sua Graça e olhar misericordioso sobre este humilde pecador.

À minha Família, meus pais Jacinto e Leda, minha irmã Jaqueline, meu cunhado Fabiano e minha sobrinha Valentina, razão dos sorrisos em horas difíceis. A vocês sou eternamente grato, por acreditarem em qualquer sonho meu e viverem os desafios junto comigo.

Aos meus amigos de ontem, hoje e sempre, Jefferson, Gabriel, Artur, Rita, Tamires, Raquel e Dayane, a quem carinhosamente chamamos de G7, obrigado por estarem sempre presentes.

Aos meus amigos de todos os dias, Rosane, Julia, Hanna e Alex, Wilson, Isabel e Joyce. Deus ilumine suas vidas e retribua todo carinho e ajuda dispensados a mim durante os últimos anos.

Ao Prof. Roberto Coutinho pela orientação, ensinamentos e oportunidades de trabalhar em seus projetos, tendo a chance de me desenvolver pessoal e profissionalmente.

Aos membros da banca, professores Igor Gomes, Wendson Souza e Saul Barbosa, pelas suas contribuições e disponibilidade, sou grato.

Ao Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP), formado por pessoas que se dedicam diariamente à pesquisa e contribuem com seu tempo e entusiasmo para melhorar a sociedade de forma séria e comprometida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, atuando de forma a valorizar a pesquisa e a formação de profissionais de elevada qualificação técnica.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida, ajuda financeira que permitiu a conclusão deste trabalho, e por sua importância para os Programas de Pós-Graduação do país, fomentando a pesquisa e o desenvolvimento científico.

Aos demais amigos que me ajudaram na elaboração desta pesquisa, minha eterna gratidão, ensejando as melhores coisas para suas vidas.

RESUMO

A interferometria é uma técnica de medição que utiliza a interferência de ondas para determinar a diferença de fase entre elas e pode ser empregada no processamento de imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) que permite obter, medidas de deslocamento de superfície. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar e discutir as contribuições da interferometria SAR (InSAR) para monitoramento e acompanhamento geotécnico, destacando suas potencialidades e limitações por meio da literatura técnica. Para isso, realizou-se uma pesquisa literária em formato híbrido, com uma revisão sistemática sobre o tema proposto, elegendo conceitos, formulações e aspectos relativos ao funcionamento da técnica e um levantamento bibliométrico por meio da plataforma SCOPUS sobre aplicações da InSAR com ênfase no monitoramento geotécnico, elegendo estudos de caso de literatura nas áreas de subsidência, taludes e barragens. Como resultado, são abordados aspectos teóricos do funcionamento de sistemas SAR, incluindo suas características, sistemas terrestres, aéreos e orbitais, tipos de geometria de imageamento e princípios de processamento de imagens usando a interferometria. A análise por meio da revisão bibliométrica apresenta um panorama das publicações nos últimos cinco anos, evidenciando a quantidade de trabalhos, relação dos autores mais citados, bem como uma abordagem técnica do estado atual de difusão do tema da InSAR na geotecnia. Os estudos de caso da literatura com ênfase nas aplicações geotécnicas permitiram explorar as potencialidades da InSAR, evidenciando suas capacidades de observação de grandes áreas, séries temporais de deslocamento de longo prazo, aptidão para compor programas de monitoramento, direcionamento para implantação de instrumentos *in situ* e associação de dados interferométricos com outros tipos de dados, como Geodésicos, Geotécnicos, Geofísicos. Além das capacidades da InSAR o trabalho também aborda alguns cuidados quando do uso da tecnologia, destacando suas vantagens, limitações e as perspectivas de evolução da ferramenta para a geotecnia e demais áreas. A partir da abordagem de estudo, foi possível ressaltar aspectos técnicos, bem como explorar o campo de possibilidades da tecnologia InSAR para áreas tradicionais de estudo da geotecnia. Dessa forma o trabalho contribui para o entendimento e difusão desses conhecimentos, visando evidenciar características da InSAR para sistemas de monitoramento geotécnico.

Palavras-chave: InSAR; monitoramento; geotecnia; taludes; subsidência; barragem.

ABSTRACT

Interferometry is a measurement technique that uses the interference of waves to determine the phase difference between them and can be used in the processing of SAR (Synthetic Aperture Radar) images, which allows obtaining measurements of surface displacement. In this sense, this work aims to present and discuss the contributions of SAR interferometry (InSAR) for monitoring and geotechnical follow-up, highlighting its potentialities and limitations through the technical literature. For this, literary research was carried out in a hybrid format, with a systematic review on the proposed theme, choosing concepts, formulations and aspects related to the operation of the technique and a bibliometric survey through the SCOPUS platform on InSAR applications with emphasis on monitoring geotechnical, choosing case studies from the literature in the areas of subsidence, slopes and dams. As a result, theoretical aspects of the operation of SAR radars are addressed, including their characteristics, orbital and terrestrial systems, types of imaging geometry and principles of image processing using interferometry. The analysis through the bibliometric review presents an overview of the publications in the last five years, showing the number of works, the list of the most cited authors, as well as a technical approach to the current state of dissemination of the InSAR theme in geotechnics. Case studies in the literature with an emphasis on geotechnical applications allowed exploring the potential of InSAR, evidencing its capabilities for observing large areas, time series of long-term displacement, aptitude for composing monitoring programs, directing the implementation of instruments *in situ* and association of interferometrics with other types of data such as Geodetic, Geotechnical, Geophysical. In addition to InSAR's capabilities, the work also addresses some precautions when using the technology, highlighting its advantages, limitations and the tool's evolution prospects for geotechnics and other areas. From the study approach, it was possible to highlight technical aspects, as well as explore the field of possibilities of InSAR technology for traditional areas of study of geotechnics. In this way, the work contributes to the understanding and dissemination of this knowledge, aiming to highlight InSAR characteristics for geotechnical monitoring systems.

Keywords: InSAR; monitoring; geotechnics; slopes; subsidence; dam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Tipos de banda e aplicações.....	25
Figura 2 -	Polarização do sinal de radar enviado pela antena nos planos horizontal (a) e vertical (b).....	26
Figura 3 -	Geometria de imageamento do sistema radar de visada lateral (SLAR)	26
Figura 4 -	Princípio de funcionamento do radar.....	28
Figura 5 -	Modos de operação no sistema SAR. (a) Stripmap. (b) ScanSAR. (c) Spotlight.	31
Figura 6 -	Instalação de um sistema de GB-InSAR Linear	32
Figura 7 -	Funcionamento básico da interferometria de radar terrestre.....	33
Figura 8 -	Instalação do GBInSAR e características da imagem SAR	33
Figura 9 -	Sinalização do imageamento nas direções: (a) Norte-Sul e b) LesteOeste.....	36
Figura 10 -	Representação do sistema aéreo InSAR	36
Figura 11 -	Arranjo de radar biestático, relação entre o sinal transmitido e o eco recebido.	38
Figura 12 -	Órbitas do sistema SAR, exemplo do imageamento TerraSAR-X	39
Figura 13 -	Geometria InSAR: (a) Passagem única; (b) Passagem repetitiva.....	40
Figura 14 -	Geometria de detecção de um sistema de passagem repetida.	40
Figura 15 -	Lista de satélites que hospedam sensores de micro-ondas.....	41
Figura 16 -	Relação da fase e comprimento de onda com a distância inclinada...	47
Figura 17 -	Geração de interferograma.	49
Figura 18 -	Imagens SAR da Mina do Manganês do Azul: (a) imagem de referência (<i>master</i>); (b) imagem repetição (<i>slave</i>); (c) Imagem de coerência interferométrica. As porções escuras da imagem representam a Floresta Amazônica (baixa coerência) e as em branco a área da Mina do Manganês do Azul (alta coerência).	52
Figura 19 -	Geometria de refletores de canto	54
Figura 20 -	Pontos de controle posicional: (a) placas de transito com estação GNSS; (b) reflexão do ponto na ortoimagem; (c) poste de iluminação com estação GNSS e (d) reflexão do ponto na ortoimagem.	55
Figura 21 -	Fluxograma de desenvolvimento da técnica DInSAR.	57

Figura 22 - Ilustração do comportamento da fase para: (a) pixel com espalhadores distribuídos; (b) pixel com espalhadores persistentes (coerentes).....	59
Figura 23 - Exemplo da configuração do método PSInSAR.....	60
Figura 24 - Fluxo genérico de processamento PSInSAR.	60
Figura 25 - Exemplo da configuração do método SBAS.	61
Figura 26 - Fluxo genérico de processamento SBAS.....	62
Figura 27 - Tipos de alvos e classificações segundo seu uso em SqueeSAR.	63
Figura 28 - Fluxo genérico de processamento SqueeSAR.....	63
Figura 29 - Fluxograma sistemático da metodologia empregada na etapa de busca na base de dados.	68
Figura 30 - Representação das informações extraídas para a etapa de tratamento dos dados.....	72
Figura 31 - Fluxograma da análise quantitativa e qualitativa dos dados bibliométricos	74
Figura 32 - Evolução do número de publicações na base de dados Scopus (2018 a 2022) sobre aplicação de InSAR em subsidência.....	79
Figura 33 - Análise das citações dos artigos sobre aplicação de InSAR em subsidência: (a) 10 maiores quantidade de citações, 10 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 11 artigos.	80
Figura 34 - Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados, sobre aplicação de InSAR em subsidência.	81
Figura 35 - O mapa de velocidade de deslocamento da linha de visada (LOS) da área de estudo. A área de estudo está marcada pelo polígono preto tracejado. Velocidades mínimas de deformação do solo são observadas nos polígonos amarelos tracejado 1 e 2.	83
Figura 36 - Séries temporais de deslocamento LOS cumulativo para os pontos PS selecionados ao longo da Seção A–A': (a) PS A01-para-PS A04 e (b) PS A05-para-PS A08. As localizações dos pontos PS, poços verticais e rota do túnel são mostradas em (c).....	84
Figura 37 - Séries temporais de deslocamento LOS cumulativo para os pontos PS selecionados ao longo da Seção B–B': (a) PS B01-para-PS B04	

	e (b) PS B05-para-PS B08. As localizações dos pontos PS e do Eixo Vertical 1 são mostradas em (c).....	85
Figura 38 -	Localização das estações geodésicas no estado de Aguascalientes (a) e na cidade de Aguascalientes em detalhe (b). As linhas vermelhas nos mapas são os vestígios de falhas e as linhas verdes são indicações das subfaixas das órbitas ascendentes e descendentes.....	87
Figura 39 -	Velocidades vertical de dados geodésicos: (a) nos benchmarks GNSS e estações permanentes e (b) nos benchmarks de nivelamento; ambos plotados sobre velocidades verticais derivadas de PSI.	88
Figura 40 -	Velocidades horizontais de dados GNSS nos pontos de referência: (a) vetor de velocidade horizontal plotado sobre velocidades verticais derivadas de PSI e (b) apenas velocidades Leste-Oeste plotadas sobre velocidades derivadas de PSI.....	89
Figura 41 -	Velocidade de deslocamento vertical: (a) mapa de localização (Dados PSI) e (b) gráfico de comparação dos benchmarks.....	90
Figura 42 -	Área de estudo e resultados de séries temporais de deslocamento vertical.....	91
Figura 43 -	Séries temporais de deslocamento vertical de 1995–2020 de um alvo na bacia principal de subsidência.....	92
Figura 44 -	Evolução do número de publicações na base de dados Scopus (2018 a 2022) sobre aplicação de InSAR em talude.....	95
Figura 45 -	Análise das citações dos artigos sobre aplicação de InSAR em talude: (a) 10 maiores quantidade de citações, 12 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 11 artigos.	96
Figura 46 -	Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados, sobre aplicação de InSAR em talude.	97
Figura 47 -	(a) Vista de deslizamento de terra; (b) Análise de pré-falha A-DInSAR para o deslizamento; (1) e (2) medições de séries temporais de deslocamentos	99
Figura 48 -	Mapa de deformação do solo pré-evento para o deslizamento de Maoxian.....	100

Figura 49 -	Localização das áreas de análise e evolução do deslocamento.....	101
Figura 50 -	Dados LOS Descendente: (a) ERS (1992 a 2000); (b) Envisat (2003 a 2010); (c) COSMO-SkyMed (2010 a 2014) e (d) localização dos extensômetros e inclinômetros.....	103
Figura 51 -	Comparação espacial entre os dados MT-InSAR Sentinel 1 e a deformação medida pela rede de sensores sem fio.....	104
Figura 52 -	Resultados de deslocamento dos instrumentos geotécnicos e dados Sentinel-1	105
Figura 53 -	Localização do talude: polígono branco demarca área de interesse e o polígono vermelho área ativa dos deslocamentos	106
Figura 54 -	Deslocamentos GB-InSAR médios cumulativos (LOS) na crista e na base do talude e melhor ajuste linear durante o período de monitoramento.	107
Figura 55 -	Taxa de deslocamento de LOS entre setembro de 2016 e setembro de 2017	108
Figura 56 -	Evolução do número de publicações na base de dados Scopus (2018 a 2022) sobre aplicação de InSAR em barragem.	111
Figura 57 -	Análise das citações dos artigos sobre aplicação de InSAR em barragem: (a) 10 maiores quantidade de citações, 15 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 12 artigos.	112
Figura 58 -	Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados, sobre aplicação de InSAR em barragem...	113
Figura 59 -	(a) Mapa de deslocamento dados SBAS; (b) Série de deslocamento LOS do SBAS	116
Figura 60 -	(a) Mapa de deslocamento dados PSI; (b) Série de deslocamento LOS do PSI	116
Figura 61 -	(a) Resultados SBAS e PSI combinados e as localizações dos pontos Bs e Bp (círculos pretos); (b) éries temporais de deslocamento LoS para os pontos Bs e Bp	117
Figura 62 -	Evolução espaço-temporal da deformação a partir das observações DInSAR	119
Figura 63 -	Posição e resultados das séries de deslocamento DInSAR e dos Extensômetros	120

Figura 64 - Posição e resultados das séries de deslocamento dos dispersores DInSAR e dos níveis de bolha	120
Figura 65 - Localização das antenas permanentes GNSS.....	121
Figura 66 - Deslocamento cumulativo LOS: (a) original; e (b) ajustado	122
Figura 67 - Sensibilidade do LOS a deslocamentos: (a) vertical; (b) radial; e (c) tangencial.....	123
Figura 68 - Representação esquemática de identificação de deslizamento segundo órbitas ascendentes e descendentes	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Intervalos espectrais e suas características.....	22
Quadro 2 - Resoluções e características do sensor.....	23
Quadro 3 - Características das bandas do radar.....	24
Quadro 4 - Descrição dos elementos constituintes da geometria de imageamento LOS	27
Quadro 5 - Funções dos dispositivos de um radar monoestático.....	28
Quadro 6 - Características dos satélites ALOS.....	42
Quadro 7 - Características do PALSAR	43
Quadro 8 - Características dos satélites SENTINEL.....	44
Quadro 9 - Características dos satélites TerraSAR-X e TanDEM-X	46
Quadro 10 - Comparativo entre as principais técnicas InSAR	64
Quadro 11 - Principais <i>softwares</i> para processamento de imagens SAR.....	65
Quadro 12 - Resumo das palavras-chave utilizadas na base de dados Scopus na etapa de identificação	69
Quadro 13 - Estudos sobre subsidência no mundo.....	93
Quadro 14 - Estudos sobre Taludes no mundo usando a InSAR.....	109
Quadro 15 - Estudos sobre Barragens no mundo usando a InSAR.....	124
Quadro 16 - Aspectos relevantes sobre a tecnologia InSAR	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidades de artigos reportados na etapa de identificação	70
Tabela 2 - Quantidades de artigos selecionados após critérios de exclusão	71
Tabela 3 - Quantidade de artigos elegidos para a etapa de inclusão.....	71
Tabela 4 - Aplicação da tecnologia InSAR.	76
Tabela 5 - Características dos impactos da subsidência do solo.	78
Tabela 6 - Principais instituições com publicações sobre aplicação de InSAR em subsidência.	79
Tabela 7 - Principais periódicos com as métricas de impacto.	82
Tabela 8 - Principais instituições com publicações sobre aplicação de InSAR em talude.	96
Tabela 9 - Principais periódicos com as métricas de impacto.	98
Tabela 10 - Principais instituições com publicações sobre aplicação de InSAR em barragem.....	112
Tabela 11 - Principais periódicos com as métricas de impacto.	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVNIR-2	<i>Advanced Visible and Near Infrared Radiometer</i>
DInSAR	<i>Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>
DS	<i>Distributed Scatterer</i>
Envisat	<i>Environmental Satellite</i>
ERS	<i>European Remote Sensing Satellite</i>
GB-InSAR	<i>Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
JERS	<i>Japanese Earth Resource Satellite</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LOS	<i>Light of Sight</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MT-InSAR	<i>Multi Temporal Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>
PS	<i>Persistent Scatterers</i>
PSI	<i>Persistent Scatterers Interferometric</i>
PSInSAR	<i>Persistent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
Radar	<i>Radio Detection And Ranging</i>
Radarsat	<i>Radar Satellite</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBAS	<i>Small BAseline Subset</i>
SqueeSAR	<i>Squee Synthetic Aperture Radar</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2	RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR): PRINCÍPIOS E CONCEITOS	21
2.1	PRINCÍPIOS DE SENSORIAMENTO REMOTO	21
2.1.1	Classes de Sensores	21
2.1.2	Intervalos Espectrais	22
2.2	IMAGEAMENTO POR RADAR.....	23
2.2.1	Princípios físicos do Radar	24
2.2.2	Funcionamento Básico do Sistema Radar	27
2.3	RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR).....	28
2.3.1	Resolução Radar	29
2.3.2	Modos de operação SAR: Stripmap, ScanSAR e Spotlight	30
2.3.3	Sistema terrestre de aquisição de imagens	31
2.3.4	Sistemas aerotransportados de aquisição de imagens	35
2.3.5	Sistemas orbitais de aquisição de imagens orbitais	38
3	INTERFEROMETRIA POR RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (INSAR)	47
3.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS	47
3.2	FASE INTERFEROMÉTRICA.....	48
3.3	COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA.....	50
3.4	FONTES DE ERROS.....	52
3.5	INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR (DINSAR).....	55
3.6	INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR AVANÇADA (A-DINSAR).....	58
3.6.1	Interferometria por Espalhadores Persistentes SAR (PSInSAR)	58
3.6.2	Small Baseline Subset (SBAS)	61
3.6.3	Tecnologia SqueeSAR	62
3.7	SOFTWARES PARA PROCESSAMENTO DE IMAGENS SAR.....	64
4	METODOLOGIA	66

4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	66
4.2	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	67
4.3	PESQUISA BIBLIOMÉTRICA.....	67
4.3.1	BUSCA NA BASE DE DADOS.....	68
4.3.2	TRATAMENTO DOS DADOS.....	72
4.3.3	ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA DOS DADOS BILBIOMÉTRICOS	73
5	APLICAÇÕES DA INSAR NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO	75
5.1	APLICAÇÕES DA INSAR.....	75
5.2	MONITORAMENTO DE SUBSIDÊNCIA	77
5.2.1	Resultados Bibliométricos	78
5.2.2	Casos da Literatura	82
5.3	MONITORAMENTO DE TALUDES	94
5.3.1	Resultados Bibliométricos	95
5.3.2	Casos da Literatura	98
5.4	MONITORAMENTO DE BARRAGENS	110
5.4.1	Resultados Bibliométricos	111
5.4.2	Casos da Literatura	114
5.5	SÍNTESE DAS APLICAÇÕES	125
6	ASPECTOS RELEVANTES DA TECNOLOGIA INSAR.....	128
6.1	RECOMENDAÇÕES.....	128
6.2	VANTAGENS	132
6.3	LIMITAÇÕES.....	134
6.4	TENDÊNCIAS	136
6.5	SÍNTESE DAS DISCUSSÕES.....	138
7	CONCLUSÕES	140
	REFERÊNCIAS.....	142

1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto é uma tecnologia, das mais bem-sucedidas, para coleta automática de dados com a finalidade de acompanhamento e monitoramento de recursos da superfície terrestre. Essa técnica teve origem em 1960, quando se vivia o período da corrida espacial, com os primeiros satélites lançados voltados para aquisição de informações meteorológicas. A partir do desenvolvimento de várias missões espaciais, começaram a ser desenvolvidos sensores imageadores que, quando combinados com os satélites artificiais, permitiram rápido desenvolvimento do levantamento de informações da superfície terrestre (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Apesar de existirem sensores de natureza distintas, como ópticos e termais, os sistemas radares ativos são dos mais utilizados no sensoriamento remoto, tendo em vista a capacidade de produzir sua própria radiação eletromagnética artificial. Os radares imageadores por apresentarem grandes comprimentos de onda conseguem atravessar as camadas de nuvem da atmosfera, conferindo imageamento sob quaisquer condições climáticas e de iluminação (HARTWIG, 2014).

A partir do desenvolvimento dos radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR), foi possível um ganho significativo da capacidade de imageamento global. O imageamento a partir do SAR pode ser feito por meio de múltiplas plataformas, como aviões, helicópteros, bases terrestres e a forma mais comum, através de satélites orbitais (GAMA *et al.*, 2015), sendo empregada em diversas aplicações, tais como: detecção de desmatamento florestal, monitoramento de infraestrutura urbana, aplicações em geociências e área de transportes.

A evolução dos sensores permitiu melhorias na qualidade do registro de informações dos objetos imageados e, com isso, motivou a necessidade de técnicas como a interferometria para processamento dos dados adquiridos pelo SAR. A Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR), especialmente orbital, a partir dos estudos de Gabriel, Goldstein e Zebker (1989), possibilitaram avanços importantes no processamento de imagens SAR, atualmente conceitos inaugurados por esses autores têm sido aplicados ao monitoramento do movimento da superfície do solo (XING *et al.*, 2022).

Atualmente, com técnicas de algoritmos de processamento de imagens eficientes e a disponibilidade de dados interferométricos com melhorias da resolução espacial e temporal, tem se tornado possível usar essa tecnologia em aplicações

geotécnicas, permitindo explorar os aspectos ligados à geometria do relevo, como Modelos Digitais de Elevação (MDE) e medidas de deslocamento (HU *et al.*, 2021). Dessa forma, uma discussão mais aprofundada sobre os conceitos da Interferometria SAR se justifica, dada a relevância tecnológica e contribuições para o contexto geotécnico.

Diante desse contexto, neste trabalho são apresentadas e discutidas características dos sensores do tipo SAR, além de conceitos, fundamentos e técnicas de processamento de imagens por meio da interferometria, com vistas ao entendimento das capacidades, limitações e perspectivas da técnica para auxílio no monitoramento geotécnico. Também são apresentados e discutidos estudos de caso de literatura que usam a InSAR como ferramenta para acompanhamento de deslocamentos, em aplicações geotécnicas como taludes, subsidência e barragens.

A contribuição deste estudo visa destacar aspectos da Interferometria de Radar de Abertura Sintética para auxílio no monitoramento geotécnico, especialmente, subsidência, taludes e barragens. A organização de conceitos e a sistematização de aspectos possibilita melhor entendimento para sua aplicação, bem como destaca relevante discussão técnica sobre limitações e desafios tecnológicos a serem superados, visando melhores entendimentos e usabilidade.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa podem ser definidos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as potencialidades e limitações da tecnologia InSAR para o monitoramento geotécnico por meio da literatura técnica-científica, com ênfase aos últimos cinco anos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar publicações InSAR sobre os temas: barragem, subsidência e taludes;

- Discutir estudos de caso da aplicação InSAR na área de geotecnia; e
- Evidenciar potenciais cuidados e tendências da técnica InSAR na engenharia geotécnica.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A fim de facilitar o entendimento do leitor é apresentada uma breve síntese dos capítulos a serem abordados no estudo. A dissertação está dividida em 7 capítulos, iniciando por este, com aspectos introdutórios sobre o tema, tendo os demais a seguinte estrutura:

O capítulo 2 apresenta uma conceituação literária sobre Radar de Abertura Sintética, com uma análise dos avanços de sensoriamento remoto, princípios de imageamento por radar, com conceitos físicos e ilustrações sobre a temática. Destaca também características específicas sobre os radares, como geometria modos de operação e algumas constelações de satélites.

O capítulo 3 faz uma revisão dos conceitos fundamentais para o entendimento da interferometria SAR, destacando também tipos de erros. No capítulo ainda se discute as principais técnicas de processamento da InSAR, discorrendo sobre suas diferenças e princípios de operação.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia do trabalho, descrevendo as etapas percorridas para se alcançar o objetivo proposto no estudo. Nesse capítulo são apresentados fluxogramas e as metodologias literárias de análise empregadas para realização das buscas científicas e dos conceitos levantados sobre o tema.

O Capítulo 5 apresenta e discute casos de literatura recente que usaram a InSAR como ferramenta de monitoramento, destacando uma diversidade de aplicações em subsidência, taludes e barragens.

No capítulo 6 é feita uma síntese das informações apresentadas nos demais capítulos, mostrando aspectos da tecnologia InSAR que denotam suas capacidades, limitações, cuidados e tendências.

Por fim, no capítulo 7 realiza-se apontamentos sobre a pesquisa desenvolvida, indicando as contribuições e as lacunas identificadas na pesquisa, permitindo a continuidade dos estudos sobre o tema.

2 RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR): PRINCÍPIOS E CONCEITOS

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos referente a tecnologia radar, princípios físicos, tipos de sensores, mecanismos de imageamento, funcionamento, resolução e modos de operação. Além dessas informações são apresentadas algumas das principais constelações de radar, com informações sobre modo de operação, tempo de revisita e características dos sensores e bandas de operação.

2.1 PRINCÍPIOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento Remoto pode ser definido como a arte e a ciência de obter informações sobre um objeto sem estar em contato físico direto com o mesmo. Essa ferramenta pode ser usada para medir e monitorar importantes características biofísicas e atividades humanas na Terra (JENSEN, 2009; TORRES, 2011). Atualmente, imagens de sensores remotos podem ser obtidas a partir de diversas plataformas, como satélites, aeronaves, veículos aéreos não tripulados (VANTs), máquinas agrícolas autopropelidas, entre outros (BASSOI *et al.*, 2014; FINATTO, 2021).

O sensoriamento remoto é uma técnica efetiva para o estudo de análise temporal, permitindo identificar e mapear alterações em uma variedade de fenômenos que ocorrem ao longo do tempo (ASWATHI, 2022). Os diferentes tipos de técnicas e sensores permitem que existam vantagens e desvantagens de acordo com suas características. Nas próximas seções serão apresentadas algumas delas.

2.1.1 Classes de Sensores

Para a obtenção de imagens, os sistemas de sensoriamento remoto necessitam da energia irradiada da cena da imagem. A fonte dessa iluminação divide os sensores em duas categorias: passivos e ativos. Os sensores passivos utilizam energia natural dos raios solares refletida nos objetos. Pensando nos satélites que carregam sensores desse tipo, as imagens geradas não possuirão alta qualidade nos locais e períodos em que não há incidência de luz solar adequada. Os sensores ativos são aqueles que

possuem a própria fonte de energia eletromagnética emitida para os alvos, o radar é um exemplo de sensor ativo (MENESES; ALMEIDA, 2012).

São exemplos de sensores passivos os sensores multiespectrais a bordo de diversos satélites como o *Operational Land Imager* (OLI) a bordo do satélite Landsat 8 e a *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites TERRA e AQUA. Os sensores ativos, como os radares, sonares, sensores ativos de dossel (como o *Crop Circle* e *Greenseeker*) e LiDAR (BASSOI *et al.*, 2014).

2.1.2 Intervalos Espectrais

Sabendo que a radiação eletromagnética de cada comprimento de onda interage de formas distintas e com intensidades diferentes com os objetos terrestres, um dos parâmetros mais importantes para definir as características de um sensor são os comprimentos de onda das imagens que o sensor irá adquirir (MENEZES *et al.*, 2012). Existem diferentes faixas ou intervalos do espectro em que os sensores conseguem obter as informações necessárias para a formação das imagens. Em função das regiões de absorção da radiação eletromagnética pela atmosfera, os intervalos discriminados no Quadro 1 são aqueles em que, é possível se obter imagens a partir de sensores instalados em aeronaves ou satélites.

Quadro 1 - Intervalos espectrais e suas características.

Intervalo Espectral	Comprimento de Onda	Intervalos discriminados	Exemplos de aplicações
Visível	0,38 – 0,76 μm	0,45 – 0,76 μm	O olho humano sensível a região
Infravermelho próximo	0,76 – 1,2 μm	0,76 – 0,91 1,00 – 1,12	Identificação da natureza de vários tipos de rochas
Infravermelho de ondas curtas	1,2 – 3,0 μm	1,19 – 1,34 1,55 – 1,75 2,05 – 2,40	Minerais de alteração hidrotermal
Infravermelho médio	3,0 – 5,0 μm	3,5 – 4,2 4,5 – 5,0	Alvos com elevadas temperaturas, como vulcões e incêndios.
Infravermelho termal	5,0 μm – 1 mm	8,0 μm – 9,2 10,2 – 12,5 μm	Radiação emitida pelos objetos em função da sua temperatura superficial.
Micro-ondas	1 mm – 100 cm	3,0cm – 100cm	Região de uso de sensores ativos (radar), que utilizam fontes artificiais para a geração da REM.

Fonte: Adaptado de MENEZES *et al.* (2012).

Cada sensor possui propriedades a respeito da capacidade de reconhecer objetos de acordo com seu tipo de material e tamanho, além de distinguir objetos e fenômenos através da radiação medida e evolução temporal. Essas características são chamadas de resolução dos sensores. O Quadro 2 apresenta um resumo dessas características. Esses tipos de resolução são aplicáveis para os sensores que operam com o comprimento de onda na faixa do visível.

Quadro 2 - Resoluções e características do sensor

Resolução	Definição
Espacial	Menor elemento ou superfície distinguível pelo sensor.
Espectral	O termo resolução espectral envolve o número de bandas que o sensor possui; a largura em comprimento de onda das bandas e as posições que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético.
Radiométrica	Diz respeito à forma e a precisão de como a radiação eletromagnética é medida pelo sensor remoto. Expressa através de níveis de cinza, ou bits.
Temporal	A resolução temporal diz respeito ao intervalo de tempo necessário para a obtenção de imagens de um mesmo local.

Fonte: Adaptado de FLORENZANO (2002), MENEZES *et al.*(2012) e (TORRES, 2011)

2.2 IMAGEAMENTO POR RADAR

O RADAR (*Radio Detection and Ranging*) é um tipo de sensor ativo que utiliza de uma fonte de radiação eletromagnética artificial e opera no intervalo espectral das micro-ondas. Em geral, o radar pode ser agrupado em sistemas imageadores e não imageadores. Os imageadores compreendem os sistemas de antena rotatória e os radares de visada lateral (SLAR). A definição de SLAR engloba dois tipos de radar: o de abertura real (RAR - *Real Aperture Radar*), modelo antigo e fora de funcionamento, e o de abertura sintética (SAR- *Synthetic Aperture Radar*) (DUTRA *et. al*, 2003; SOUZA, 2022).

Por causa do grande comprimento das micro-ondas, o sensor não é barrado ou absorvido pelas micrométricas partículas ou gases da atmosfera. Essa condição permite obter imagens, mesmo quando a cobertura de nuvens é total. E pelo fato da fonte ser ativa, o imageamento pode ser feito em qualquer hora do dia ou da noite (MENEZES *et al.*, 2012).

Os sistemas de radar são, geralmente, compostos por um transmissor, um receptor, um modulador, um processador e uma antena. A antena emite pulsos em direção aos alvos e registra a energia refletida ou retroespalhada, que é equivalente a energia solar refletida detectada por sensores passivos. ele registra a potência, a variação temporal e o tempo de retorno do pulso retroespalhado (NOVO, 2001; DUTRA, 2003; SANO, 2020).

2.2.1 Princípios físicos do Radar

O sistema de imageamento com radar opera na frequência das micro-ondas, entre 0,3 a 30 GHz, ou 1 a 100cm. Os comprimentos de onda das imagens de radar são identificados por letras derivadas da operação dos primeiros sistemas de radar, dos anos 1940. A escolha do comprimento de onda do radar deve ser compatível com o tamanho das feições do alvo que se deseja identificar. O Quadro 3 apresenta as bandas mais utilizadas e o comprimento de onda correspondente, além de exemplos de aplicação.

Quadro 3 - Características das bandas do radar

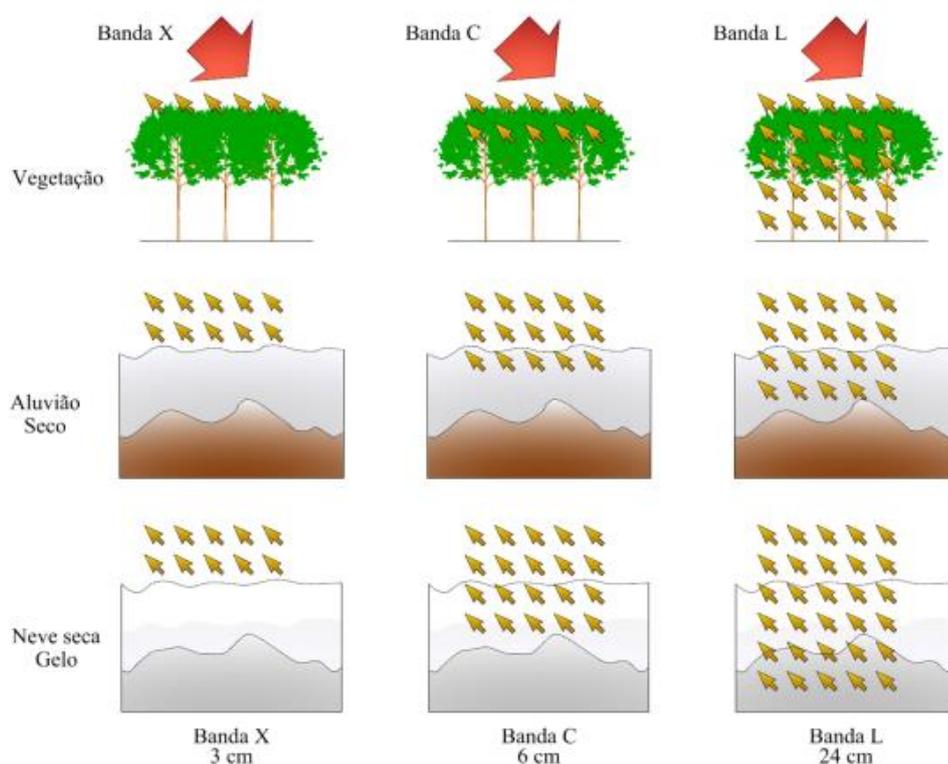
Banda	Comprimento de onda	Frequência	Aplicações
X	2,4 - 3,8 cm	12,5 - 8 GHz	Variações texturais de solo e investigação da superfície
C	3,8 - 7,5 cm	8 - 4 GHz	Caracterização da umidade do solo, agricultura, investigação da superfície e estudo dos oceanos
S	7,5 - 15 cm	4 - 2 GHz	Agricultura, medição de biomassa, e estudo dos oceanos
L	15 - 30 cm	2 - 1 GHz	Mapeamento geológico, agricultura, umidade do solo e penetração do terreno
P	30 - 100 cm	1 GHz - 300 MHz	Áreas de vegetação densa

Fonte: Adaptado de MENEZES *et al.*, (2012); FINATTO (2021); SOUZA (2022).

A faixa espectral de micro-ondas apresenta vantagens na detecção remota já que o pulso de onda eletromagnética penetra as nuvens, e, dependendo da faixa de frequência, solos, copa de árvores e neve. Quanto menor a frequência, maior é a capacidade de penetração, por exemplo, banda L (Figura 1). Esta característica é

interessante, sobretudo, para regiões tropicais úmidas, como a Amazônia, onde o uso de sensores ópticos é prejudicado devido à alta ocorrência de chuvas e nuvens (PINTO, 2015).

Figura 1 – Tipos de banda e aplicações

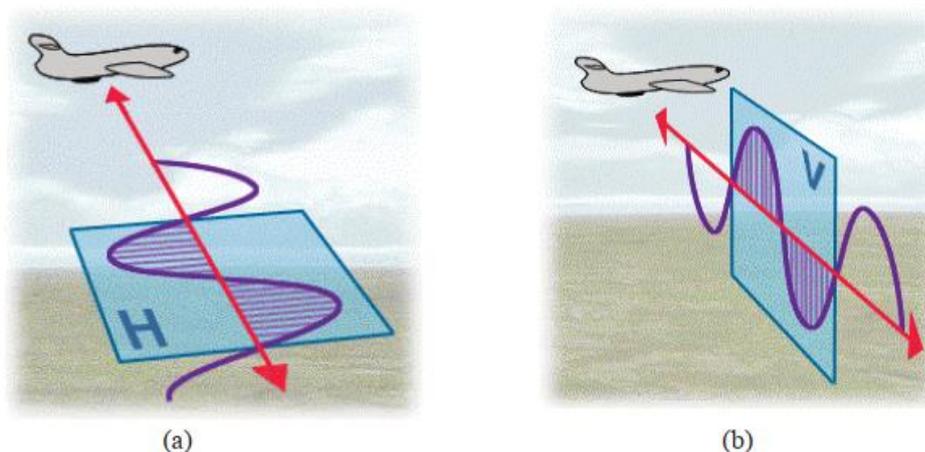


Fonte: ESA (2019).

Os sistemas radares apresentam visada lateral oblíqua e registram a informação total da radiação eletromagnética. A interação do campo elétrico da iluminação com o alvo é controlada pela, entre outros aspectos, pela polarização da onda emitida. Os sensores radar operam com a energia polarizada. Basicamente, a polarização se refere à orientação do campo elétrico utilizado e as vibrações do vetor campo elétrico (\vec{E}) ocorrem num único plano, perpendicular à direção de propagação da radiação.

Os atributos de polarização do pulso transmitido podem ter características horizontal (H) ou vertical (V). Se a polarização transmitida é a mesma que a recebida é chamada direta ou paralela (HH e VV). Os demais casos (HV e VH) são chamados de polarização cruzada. A primeira letra refere-se à polarização da radiação transmitida e a segunda à polarização da radiação recebida pela antena. Quando as micro-ondas incidem uma superfície e é retroespalhada, a polarização pode ser modificada, de acordo com as propriedades físicas do alvo (DUTRA et.al, 2003; PINTO, 2015; FINATTO, 2021).

Figura 2 - Polarização do sinal de radar enviado pela antena nos planos horizontal (a) e vertical (b)

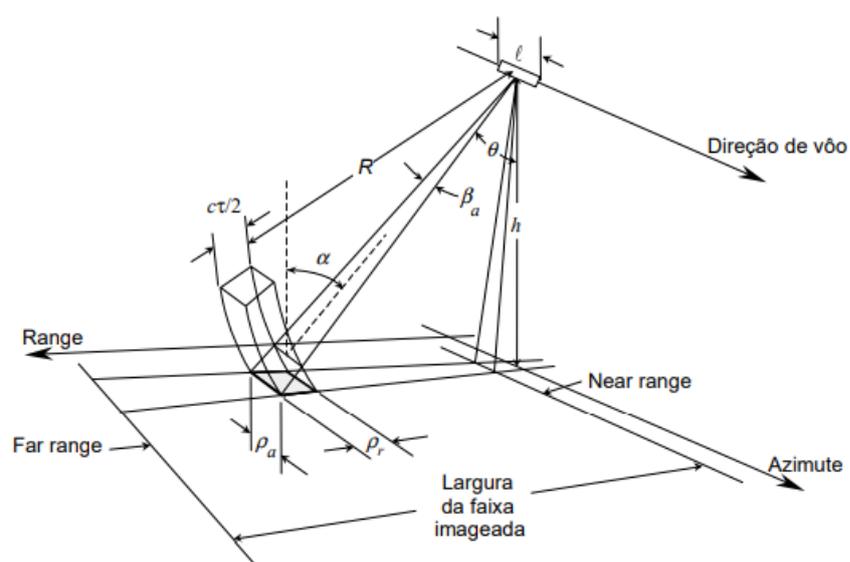


Fonte: Meneses; Almeida, (2012).

O imageamento por radar consiste na emissão de pulsos de micro-ondas a intervalos regulares sobre a região de interesse e a recuperação dos sinais de retorno (ecos) provenientes desta região, à medida que o sensor se desloca. A recepção do sinal de retorno pode ser feita utilizando-se a mesma antena emissora (sistemas monoestáticos) ou uma segunda antena (sistemas biestáticos).

A Figura 3 ilustra a geometria de imageamento de um SLAR, onde se destacam os principais parâmetros relacionados ao imageamento, tais como: ângulo de incidência e de visada, resoluções espaciais em *ground range* (direção no solo perpendicular à direção de voo) e em *slant range* (direção oblíqua perpendicular à direção de voo), área imageada, largura do feixe, entre outros (DUTRA et.al, 2003).

Figura 3 - Geometria de imageamento do sistema radar de visada lateral (SLAR)



Fonte: Dutra et.al (2003).

Quadro 4 – Descrição dos elementos constituintes da geometria de imageamento LOS

Elemento	Descrição
Direção em azimute	Direção horizontal paralela a direção de voo da plataforma
Direção de alcance (<i>range</i>)	Direção perpendicular à direção de voo da plataforma.
Ângulo de incidência (θ)	Ângulo formado entre a radiação incidente na superfície e a normal
Alcance no terreno (<i>ground range</i>)	Distância sensor-alvo medida no terreno
Alcance próximo (<i>near range</i>)	Extremidade da imagem mais próxima da antena do radar ou do sinal transmitido pela antena
Alcance distante (<i>far range</i>)	Extremidade da imagem mais distante do sinal transmitido pela antena
Faixa de imageamento	Distância entre o alcance próximo e o alcance distante
Alcance inclinado (<i>slant range</i>) (R)	Distância real entre sensor e alvo
A faixa de imageamento (<i>swath</i>)	Largura total do terreno imageado
Área de iluminação da antena	Área coberta pelo feixe da antena na superfície do terreno
Altitude (h)	Altura da plataforma

Fonte: Adaptado de Novo (2001) e Hartwig (2014).

2.2.2 Funcionamento Básico do Sistema Radar

O funcionamento básico do sistema radar consiste no tempo entre a transmissão do pulso, que viaja aproximadamente a velocidade da luz, e a recepção da radiação retroespalhada Figura 4. Devido ao tempo de atraso entre a transmissão e recepção, a distância pode ser medida pela Equação (1) (WOODHOUSE, 2006).

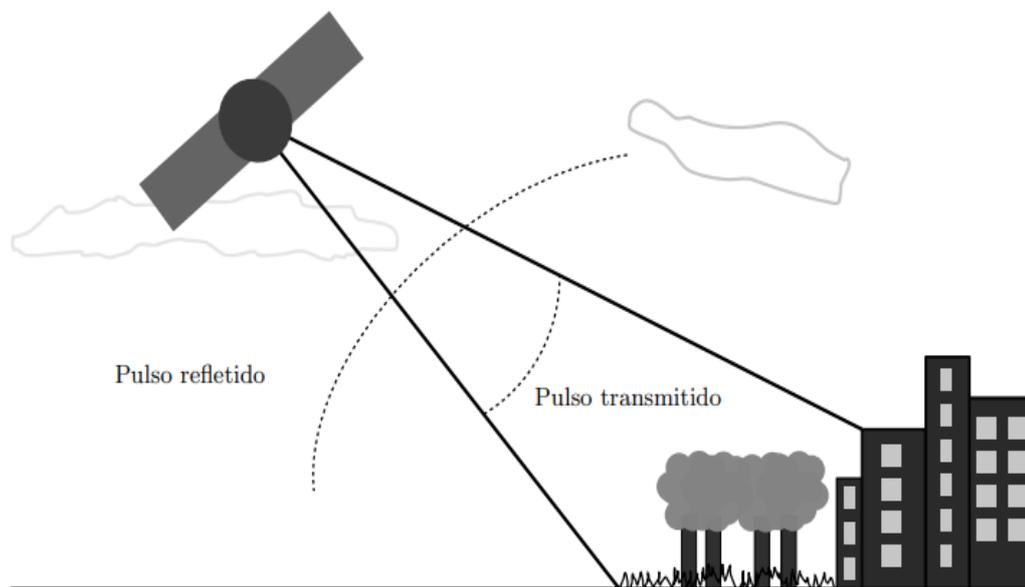
$$R = \frac{c\tau}{2} \quad (1)$$

Em que:

- c : corresponde à velocidade da luz;

- τ ao tempo de ida e volta do sinal.

Figura 4 - Princípio de funcionamento do radar



Fonte: Finatto (2011).

Um instrumento radar monoestático, no qual a radiação é emitida e recebida pela mesma antena, é constituído tipicamente pelos seguintes dispositivos: antena, transmissor, modulador, receptor e processador (MOORE, 1983b).

Quadro 5 - Funções dos dispositivos de um radar monoestático

Dispositivo	Função
Antena	Direciona o pulso das micro-ondas ao terreno
Transmissor	Emita a radiação em pulsos curtos e sucessivos (1.000 a 2.000 pulsos/s), a uma taxa da ordem de microssegundos
Modulador	Determina o tempo de duração do pulso, que controla a resolução em alcance (<i>slant</i>)
Receptor	Amplifica e registra o tempo do sinal de retorno retro espalhado pelo terreno
Processador	Transforma o sinal registrado em uma imagem digital

Fonte: Adaptado de Hartwig (2014).

2.3 RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)

O Radar de Abertura Sintética (SAR) é um dos tipos de radar de imageamento. O termo “abertura sintética” deriva do fato da abertura de irradiação da antena estar

na direção do azimute. O SAR surge como uma solução eficaz às limitações operacionais do sistema RAR, ao utilizar de uma melhor resolução azimutal, independente da distância. Ele possui uma direção de iluminação lateral e pode recuperar com precisão a localização de um alvo em relação à posição da plataforma onde o sensor está montado (PEPE, 2017; SOUZA, 2022).

Como um radar convencional, o SAR emite ondas eletromagnéticas sequencialmente e os ecos retroespalhados são coletados pela antena do radar. Nesse caso, o tempo consecutivo de transmissão e recepção resulta em diferentes posições devido ao movimento da plataforma. Uma combinação coerente apropriada dos sinais recebidos permite a construção de uma abertura virtual muito maior que o comprimento físico da antena. Esse atributo básico do SAR está na origem de seu nome “abertura sintética” (MOREIRA, 2013).

O SAR possui algumas vantagens como a geometria de iluminação controlada, imageamento independente de iluminação solar, operar na faixa das micro-ondas, sensibilidade às variações da morfologia da superfície e possibilidade de uso de diferentes modos de polarização (PINTO, 2015). Paradella et. al (2015) destaca ainda outros atributos do imageamento SAR. Ele é o único sensor remoto que permite penetrabilidade nos alvos, a natureza das propriedades medidas é única (propriedades elétricas e geométricas do alvo) e possui enorme capacidade em prover medidas quantitativas de propriedades dos alvos.

O avanço da tecnologia SAR e das técnicas de processamento de imagem têm contribuído para a detecção e monitoramento de diversos fenômenos geofísicos, como o movimento da superfície terrestre, consequências de terremotos, erupção de vulcões ativos, deslizamentos de terra e afundamento de solo em áreas urbanas (PEPE et. al, 2017).

2.3.1 Resolução Radar

Na tentativa de melhorar a resolução em azimute resultante do RAR, o SAR consiste em sintetizar uma antena de tamanho muito maior que o seu tamanho físico, por meio do processamento digital dos sinais refletidos pelo alvo. O SAR surge como uma solução eficaz às limitações operacionais do sistema RAR, ao possuir uma melhor resolução azimutal, independente da distância (SOUZA, 2022).

Partindo das relações geométricas de imageamento, é possível chegar na Equação 2 para resolução em azimute para o SAR. Ela independe da distância entre sensor e alvo e do comprimento de onda, sendo melhorada com a diminuição do tamanho físico da antena (RIBEIRO,1997; WOODHOUSE, 2006; HARTWIG, 2014).

$$R_a = \frac{D}{2} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

- R_a - Resolução em Azimute
- D - Tamanho da antena

E a resolução em Range pode ser definida de duas formas, como seguem na Equação 3 ou Equação 4.

$$R_r = \frac{c}{2 B_p \sin\theta} \quad \text{Equação 3}$$

ou

$$R_r = \frac{c}{2 B_p \sin\theta} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

- c - Velocidade da luz no vácuo
- τ - Largura/duração do pulso
- θ - ângulo de incidência

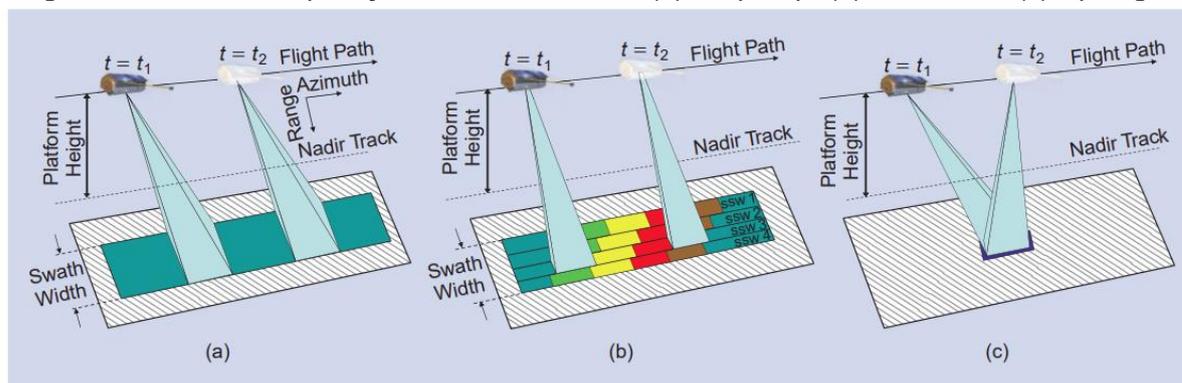
O ângulo de incidência é menor na região mais próxima da antena (near-range). Logo, na faixa mais próxima à plataforma a resolução em range será maior. Na direção perpendicular, pode-se concluir pela equação que o tamanho do pixel dependerá do comprimento do pulso. O contrário ocorre nas regiões mais afastadas da plataforma, que possuem um ângulo de incidência maior.

2.3.2 Modos de operação SAR: Stripmap, ScanSAR e Spotlight

Os modos de operação ou imageamento do SAR são caracterizados pela maneira que o feixe da antena se comporta para iluminar os alvos ao longo do plano

de voo da plataforma (FINATTO, 2021). Os três modos são Stripmap, ScanSAR e Spotlight. Cada modo apresenta vantagens e desvantagens para fenômenos que se deseja analisar, sendo o conhecimento de suas características importante para a escolha das imagens para fonte de análise.

Figura 5 - Modos de operação no sistema SAR. (a) Stripmap. (b) ScanSAR. (c) Spotlight.



Fonte: Moreira (2013).

Hartwig (2014) e Pinto (2015) resumem as características desses modos de operação. No modo Stripmap o direcionamento da antena é fixo em relação ao voo, o que resulta em uma faixa de imageamento paralela ao deslocamento da plataforma. Com esse modo é possível cobrir áreas maiores de terreno, mas com menor nível de detalhe menor que outros modos. Gera-se uma imagem de largura de faixa média, com boa resolução espacial.

No modo scanSAR, o ângulo de elevação da antena é variado, o que corresponderia a múltiplas faixas de imageamento (swath). Nesse modo, a antena é direcionada para produzir imagens adjacentes do terreno, geralmente imagens nesse modo possuem larga faixa de cobertura e baixa resolução. Por fim, para o modo Spotlight, o sensor orienta o feixe da antena de modo a iluminar uma mesma área no terreno durante seu deslocamento, permitindo obter maiores detalhes de áreas específicas com uma alta resolução.

2.3.3 Sistema terrestre de aquisição de imagens

O imageamento SAR não opera somente em plataformas como as orbitais, mas pode consistir em um radar instalado em uma plataforma terrestre móvel. Essa categoria recebe o nome de Ground-Based SAR (GB-InSAR). Uma das principais aplicações dessa técnica é para o monitoramento de deformações. Para obter maiores

informações para essa e outras aplicações a integração do GBSAR com a interferometria foi implementada com sucesso (WOODS, 2020).

O princípio de funcionamento é como o dos radares orbitais. O sensor emite micro-ondas apontando para o alvo e recebe a sua resposta, enquanto se move ao longo de um trilho. Existem classificações para o GBSAR de acordo com o seu movimento no momento do imageamento. Ele pode ser do tipo linear (SAR linear), circular (C-SAR) e, menos comum, helicoidal. O SAR também pode ser feito com múltiplas antenas transmissoras e receptoras (MIMO) (PIERACCINI *et al.*, 2019). A Figura 6 é um exemplo de um SAR linear no monitoramento de jazidas de mineração.

A montagem do GB-InSAR (Figura 7) é composta de itens robustos. Além do radar, é necessário o trilho para o scanner, uma fonte de energia, cabos de conexão, laptops resistentes a intempéries, equipamentos de telecomunicação, entre outros. O transporte e manutenção dos equipamentos requer o trabalho de várias pessoas. Os equipamentos de telecomunicações instalados permitem a conectividade remota para o monitoramento do equipamento, do *software* e dos dados, o que é um grande benefício (WOODS *et al.*, 2020).

Figura 6 - Instalação de um sistema de GB-InSAR Linear

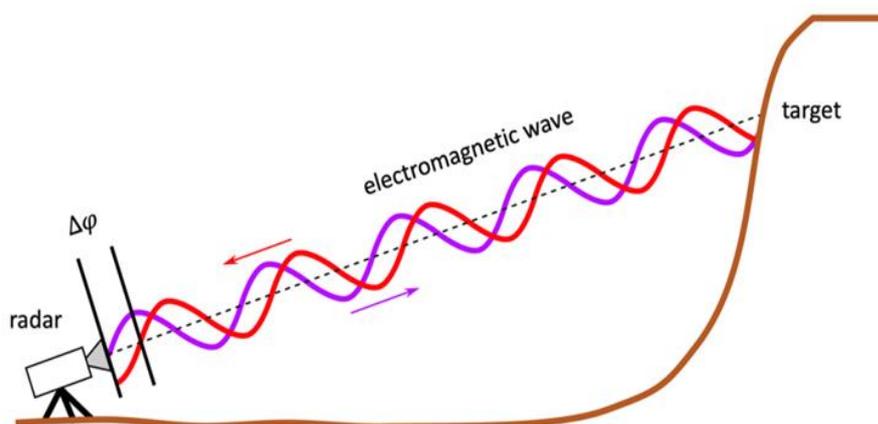


Fonte: MECATTI *et al.* (2010).

O GB-InSAR é baseado em um sistema de radar coerente, que mede não só a amplitude, mas também a fase do sinal de radar recebido (Figura 8). As medições de fase podem ser exploradas, usando técnicas interferométricas, para obter informações sobre a deformação e topografia da cena. As imagens resultantes podem ser apresentadas de forma 3D ao sobrepô-las em um modelo digital de elevação (MDE). A extensão do trilho determina a resolução cross-range das imagens adquiridas, que

é a resolução na direção do movimento do sensor. Logo, quanto mais longo o trilho, maior a resolução cross-range (MONSERRAT *et al.*, 2014; ATZENI *et al.*, 2015).

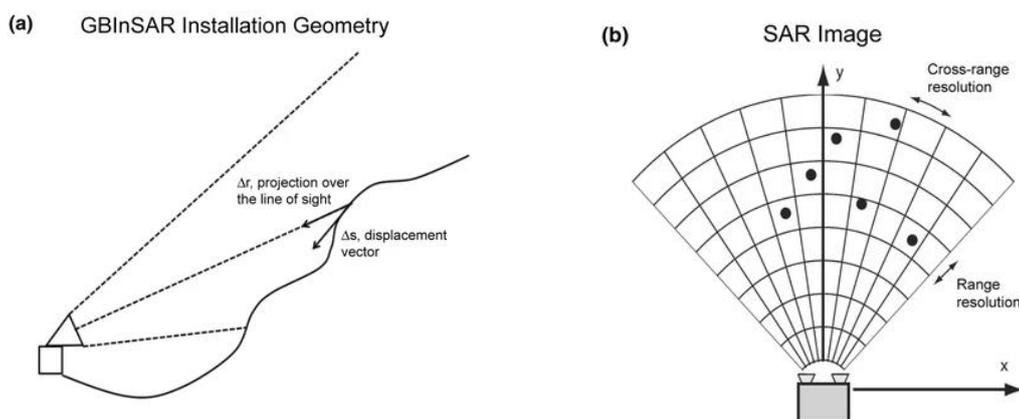
Figura 7 - Funcionamento básico da interferometria de radar terrestre



Fonte: PIERACCINI *et al.* (2019).

As medições independem da iluminação solar ou das condições atmosféricas (WOODS *et al.*, 2020). Os dados GB-InSAR são normalmente adquiridos usando um dos dois modos de aquisição: contínuo (C-InSAR) e descontínuo (D-InSAR). Para mais informações ver Crosetto *et al.* (2020), Monserrat *et al.* (2014) e Tarchi *et al.* (2005).

Figura 8 - Instalação do GBInSAR e características da imagem SAR



Fonte: ATZENI *et al.* (2015).

Algumas interferências podem afetar os dados do GBInSAR como efeitos atmosféricos, decorrelação temporal e espacial. Qiu (2016) apresenta exemplos de soluções propostas por outros autores para casos reais. Guido Luzi *et al.* (2004)

propõe que efeitos atmosféricos podem ser eliminados através da técnica PS. Aplicando a mesma técnica, Linhsia e Noferini (2005) aponta que o efeito da descorrelação pode ser extraído pela correção meteorológica e Massimiliano Pieraccini *et al.* (2006) eliminou o efeito causado pela descorrelação temporal.

A contribuição da fase atmosférica pode ser desprezada para aplicações de curto prazo, mas em outros casos deve ser removida com técnicas de processamento adequadas. Seu princípio de funcionamento é sempre baseado na identificação de alvos estáveis na imagem de radar e na compensação em relação a eles usando um modelo atmosférico adequado (PIERACCINI *et al.*, 2019).

A técnica de interferometria para o GB-InSAR tem como sua principal aplicação o monitoramento de deformações e deslizamentos de terra. Os dados adquiridos pelo radar terrestre são frequentemente integrados a levantamentos de campo geológicos e geomorfológicos, aquisições SAR espaciais, ortofotos e mapas de inventário. A técnica é utilizada para outros monitoramentos, como de pontes, barragens, outras infraestruturas civis, minas, geleiras e até vulcões (MONSERRAT *et al.*, 2014; PATRÍCIO, 2018; PIERACCINI *et al.*, 2019). Essas aplicações chegam a alcançar precisão submilimétrica (NICO *et al.*, 2018).

Essa técnica consegue superar algumas deficiências do SAR orbital, como a descorrelação espacial e temporal, além da baixa resolução (MINGSHENG *et al.*, 2003). Outra vantagem do seu uso é a capacidade de medição que independe das condições atmosféricas considerando distâncias de até alguns quilômetros. Como o instrumento pode ser instalado fora da área do alvo, é um ponto positivo para monitoramento de fenômenos de risco e pode ser utilizado em situações emergenciais (MONSERRAT *et al.*, 2014). O GB-InSAR tem a capacidade de fornecer dados densos e contínuos, 24 horas por dia. A aquisição e o processamento dos dados podem ser automatizados e configurados como uma ferramenta de monitoramento para monitorar esses fenômenos (Lombardi *et al.*, 2017).

Como desvantagens pode-se citar o fato do GBSAR só fornecer medidas na direção da linha de visada. No caso de monitoramento de construções, é difícil encontrar um lugar adequado para colocar o instrumento na sua parte inferior, como também de usar o mesmo ponto para análise em diferentes épocas (PATRÍCIO, 2018). Um aspecto que é apresentado como vantagem, mas também como limitação é o fato do GB-InSAR só realizar a cobertura de áreas de extensão limitadas. Monserrat *et al.* (2014) apresenta esse aspecto como uma vantagem em relação aos

sistemas de monitoramento por satélite, já que assim é possível imagear com maior detalhe um fenômeno específico. Já Tarchi *et al.* (2003) considera negativo que o imageamento só possa cobrir uma área de extensão limitada e que há uma necessidade da locação do equipamento ter visibilidade adequada da área a ser monitorada.

2.3.4 Sistemas aerotransportados de aquisição de imagens

Nos últimos anos, a interferometria diferencial usando sensores de radar de abertura sintética (SAR) espaciais tornou-se uma técnica estabelecida para detectar e monitorar deformações na superfície da Terra na escala de centímetros, bem como fluxos de geleiras e deslizamentos de terra. Embora muitas vezes seja muito eficiente, o uso de dados SAR espaciais tem várias desvantagens, como artefatos de fase causados por efeitos atmosféricos e baixa coerência devido a intervalos de aquisição de dados longos e ao comprimento de onda curto do sensor (REIGBER e SCHEIBER, 2003).

Os sistemas de aquisição de imagens InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) aerotransportados são usados para coletar dados de radar de alta resolução da superfície da Terra para uma variedade de aplicações, como mapeamento topográfico, monitoramento de deformação do terreno e detecção de mudanças no ambiente.

Devido a algumas limitações da aquisição de imagens a partir de plataformas orbitais, muitas empresas e pesquisadores passaram a desenvolver tecnologias com sensores embarcados em meios aéreos, como aviões, helicópteros e veículos aéreos não tripulados (*Vant*), a fim de imagear alvos na superfície terrestre (Figura 9). A técnica de DInSAR aerotransportada para medições de deslocamento foi introduzida por Reigber e Scheiber (2003) com o uso da banda L, seguido pelo uso da banda X em 2004 e da banda P em 2011 (LUEBECK *et al.*, 2020).

Figura 9 - Sinalização do imageamento nas direções: (a) Norte-Sul e b) LesteOeste

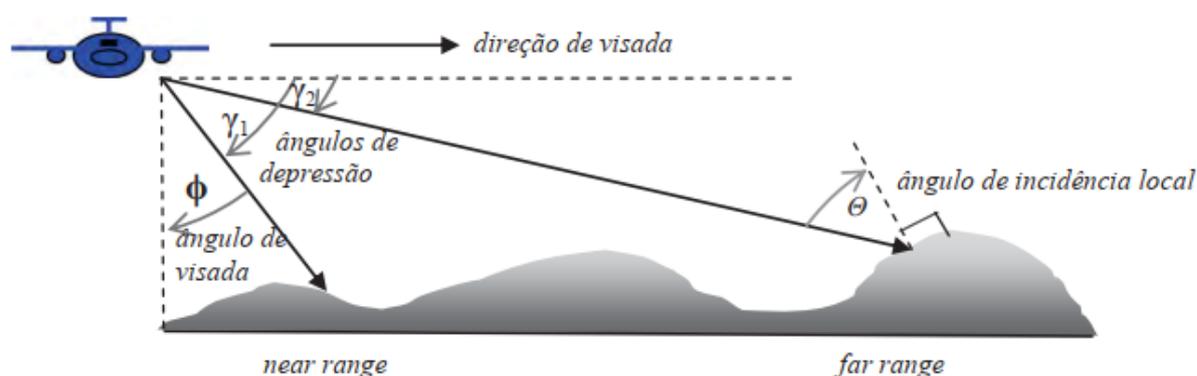


Fonte: Correia (2011).

A Figura 10 mostra a representação da aquisição de imagens por meio de plataformas aéreas, sistema muito similar a aquisição por meio de plataformas orbitais. Segundo Luebeck *et al.*, (2020) salientam que como as aeronaves possuem padrões de voo flexíveis, o levantamento da área em três direções diferentes é uma tarefa relativamente simples, permitindo a geração de mapas de deformação 3D com DInSAR aerotransportado. Além disso, breves períodos de revisita com alta resolução espacial pode ser alcançados.

Durante a coleta de dados InSAR, a plataforma aérea precisa se mover de maneira suave e controlada para minimizar os efeitos do movimento do vento durante as aquisições, que podem reduzir a qualidade dos dados coletados. Isso é especialmente importante em aplicações que exigem alta precisão, como monitoramento de deformação do terreno.

Figura 10 – Representação do sistema aéreo InSAR



Fonte: Meneses e Almeida (2012).

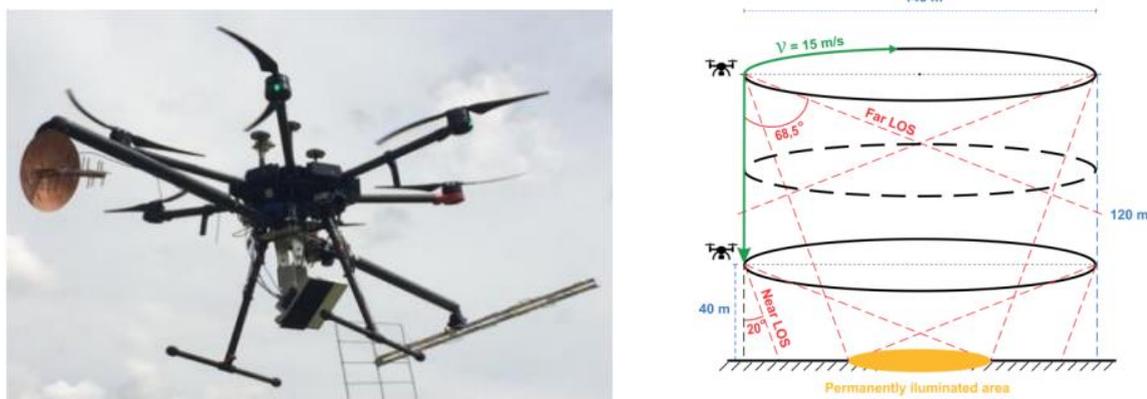
A turbulência do ar é um obstáculo para a execução precisa do DInSAR no ar, exigindo o uso de técnicas de compensação de movimento. Para Reigber e Scheiber, (2003) estacam que compensar o movimento da aeronave é o principal desafio no processamento de dados SAR aerotransportados. Isso envolve duas contribuições: deslocamentos do centro de espalhamento e deslocamentos da plataforma do sensor. Para determinar com precisão o deslocamento da superfície, é necessário estimar e corrigir adequadamente o movimento do sensor. Até mesmo um pequeno movimento não compensado do sensor - metade do comprimento de onda (12 cm na banda L), por exemplo - pode gerar um erro de fase de 360 graus.

Para alcançar movimentos suaves e controlados, a plataforma pode ser equipada com sistemas de estabilização e controle de movimento, como giroscópios e acelerômetros. Esses sistemas ajudam a manter a plataforma estável durante o voo e minimizam a vibração da aeronave, o que pode distorcer as imagens de radar coletadas. Além disso, a plataforma pode voar em padrões de voo específicos para coletar dados em diferentes ângulos e altitudes, a fim de obter uma visão mais abrangente da área de interesse. Por exemplo, ela pode voar em padrões circulares ao redor de um ponto de interesse para coletar dados de diferentes ângulos ou voar em linhas paralelas para obter uma cobertura mais ampla.

Moreira *et al.*, (2019) apresentaram um novo sistema SAR operado por drones nas bandas P-, L- e C- e foi otimizado para operações DInSAR (Figura 11). Esse sistema SAR tem uma largura de varredura muito menor em comparação com sistemas DInSAR aéreos e é capaz de cobrir áreas de até algumas dezenas de quilômetros quadrados. Os autores destacam que esse tipo de equipamento, a depender dos requisitos de aplicação pode ser empregado, pois a operação com drone é de baixo custo, permitindo uma solução SAR aerotransportada de alto desempenho, ideal para imageamento de pequenas áreas.

Os resultados de aquisição por drones, a depender do tipo de banda e das interferências no sinal, possibilitam informações de mapas de deformação precisos com resolução de alguns milímetros que são valiosos para sistemas de alerta precoce de deslizamentos de terra, falhas de barragem e gerenciamento de emergências após terremotos. Para obter bons resultados de interferometria diferencial, é necessário contar com alta relação sinal-ruído, baixa decorrelação temporal entre revisitas, alta estabilidade de fase do radar e processamento, ambiente de antena livre de interferência e dados precisos de movimento (LUEBECK *et al.*, 2020).

Figura 11 - Arranjo de radar biestático, relação entre o sinal transmitido e o eco recebido



Fonte: Moreira *et al.* (2019)

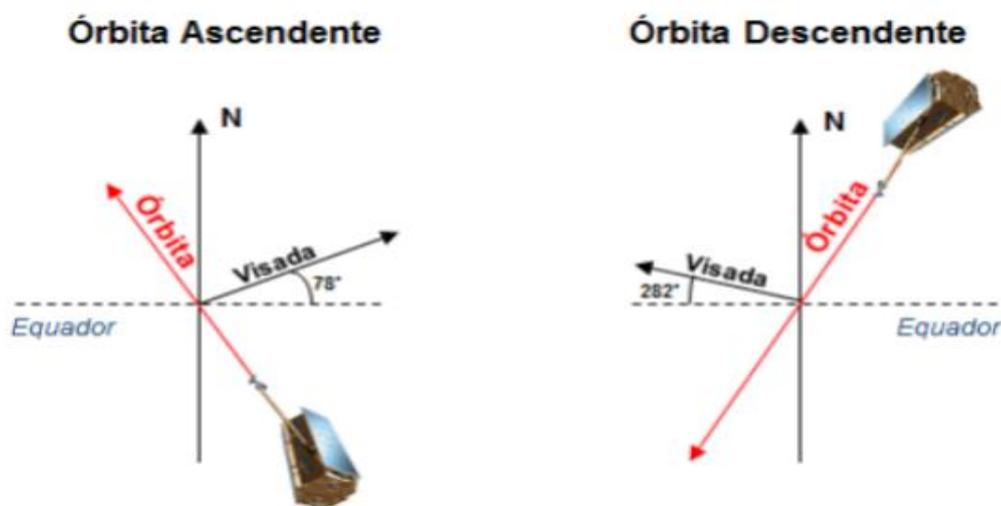
2.3.5 Sistemas orbitais de aquisição de imagens orbitais

Os sistemas SAR orbitais operam em órbitas ascendentes ou descendentes e a direção de visada é definida pelo ângulo formado entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do radar. A Figura 12 exemplifica o imageamento do satélite TerraSAR-X. Na órbita ascendente, o satélite se desloca de sul para norte, com visada para leste. Já na órbita descendente, o satélite se desloca de norte a sul, com visada para oeste (PINTO, 2015; BOULHOSA, 2022).

Com a mudança de sentido e da inclinação, o SAR consegue iluminar a mesma área, sob diferentes geometrias de observação. O conceito de geometria de visada é primordial para compreender as informações dos alvos, pois alvos com orientação perpendicular à direção de iluminação são destacados, enquanto alvos paralelos a direção de visada não são detectados (WOODHOUSE, 2006).

Devido ao fato da detecção dos deslocamentos ocorrerem segundo a linha de visão LOS ao longo do plano *slant-range* dos azimutes de visada, as órbitas dos satélites são quase-polares e o ângulo formado a órbita e o eixo NS é relativamente pequeno ($<12^\circ$), com isso as detecções nessa orientação são pouco sensíveis. Dessa forma, para se obter deslocamentos verticais e horizontais é necessário combinar aquisições segundo órbitas ascendentes e descendentes (PARADELLA; MURA; GAMA, 2021).

Figura 12 - Órbitas do sistema SAR, exemplo do imageamento TerraSAR-X

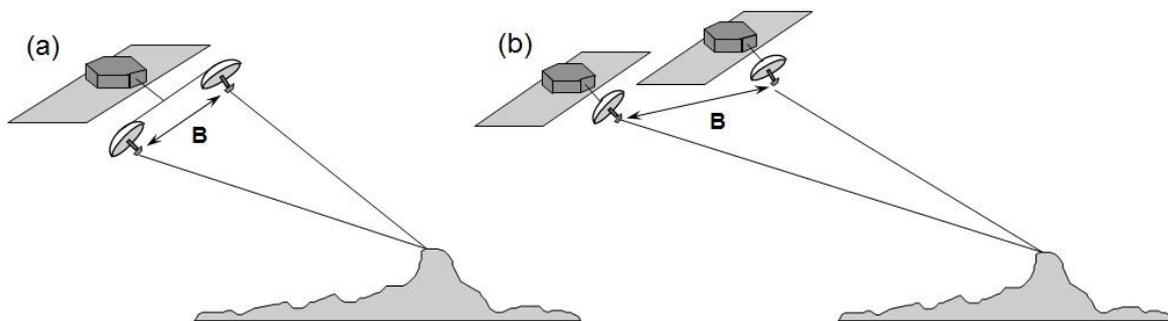


Fonte: TRE Altamira (2023).

A aquisição de um par de imagens para obtenção da interferometria de fase pode ser obtida em duas geometrias do sistema interferométrico, uma passagem (passagem única) e duas passagens (passagem repetida) (HANSSEN, 2001; PARADELLA, MURA, GAMA; 2021):

- Passagem única – utilização de duas antenas transportadas por uma única plataforma, separadas por uma distância chamada de linha de base (B), para adquirir duas cenas simultâneas. Geralmente por meio de plataformas aerotransportadas (Figura 13a).
- Passagem repetitiva – uma única antena registrando tempos diferentes e localizações aproximadas. Com isso, cada registro possui uma geometria de aquisição específica que não se repete entre as passagens dos satélites, principalmente devido a desvios nas coordenadas orbitais, resultando em distância ligeiramente diferente entre as duas imagens SAR. Isso ocorre porque a área iluminada é capturada em dois locais espaciais diferentes, resultando em diferentes ângulos de visão (Figura 13b).

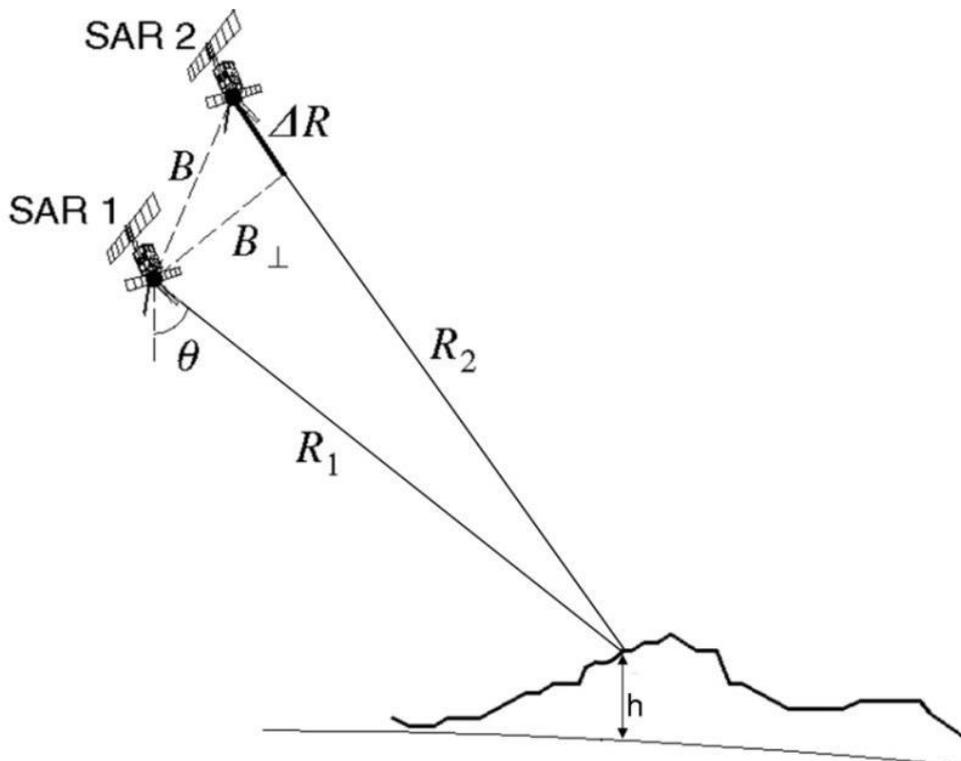
Figura 13 – Geometria InSAR: (a) Passagem única; (b) Passagem repetitiva



Fonte: Victorino (2016).

A Figura 14 mostra a geometria de detecção de um sistema de passagem repetida para calcular a fase de contribuição, usando a posição relativa do sensor. As posições SAR 2 e SAR 1 representa os dois diferentes tempos de passagem do sensor, sendo a SAR 1 a aquisição de referência (*master*) e SAR 2 a aquisição de repetição (*slave*). O B indica a linha de base interferométrica (*baseline*) e o B_{\perp} a linha de base perpendicular. Já o R_2 e R_1 a distância de um alvo na superfície para o sensor, h é conhecido como altura (ou altitude) elipsoidal.

Figura 14 – Geometria de detecção de um sistema de passagem repetida

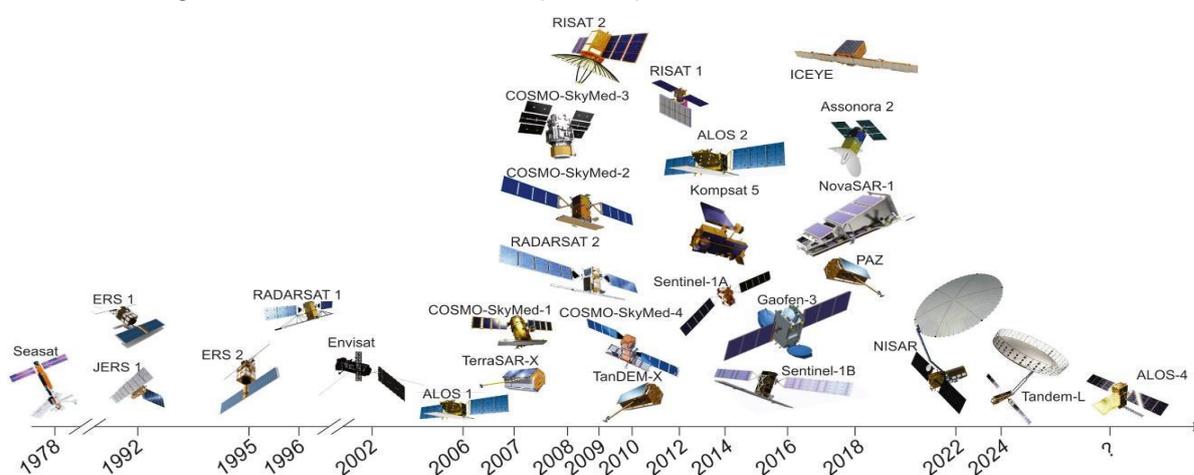


Fonte: Paradella, Mura e Gama (2021).

2.3.5.1 Constelações de Satélites

O espaço terrestre é constituído por uma razoável constelação de satélites artificiais que oferecem imagens para atender as necessidades de uma ampla demanda de usuários. Os satélites transportam sensores de diferentes características que foram apresentadas anteriormente, como as resoluções e fonte de energia. Neste tópico serão apresentadas algumas missões de satélites, com suas principais características, dando ênfase aos que possuem sensor SAR.

Figura 15 - Lista de satélites que hospedam sensores de micro-ondas



Fonte: Aswathi *et al.* (2022).

2.3.5.1.1 ALOS

Os satélites ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) fazem parte de missões da Agência Espacial Japonesa (JAXA) para a observação e monitoramento de áreas afetadas por desastres ambientais, florestas, gelo marinho e deslocamento de infraestruturas (TORRES, 2011). A primeira missão ALOS teve seu lançamento em 24 de janeiro de 2006 a 11 de maio de 2011. Sua segunda missão, ALOS-2, teve seu lançamento no dia 24 de maio de 2014 e ainda está em atividade. Mais duas missões estão em planejamento, a ALOS-3 e a ALOS-4, contando com recursos aprimorados para substituir as missões ALOS e ALOS-2, respectivamente. O ALOS-3 tem data prevista de lançamento para dia 12 de fevereiro de 2023 e a ALOS-4 para março do mesmo ano. O Quadro 6 abaixo resume algumas de suas características principais.

Quadro 6 - Características dos satélites ALOS

Missão	ALOS-1	ALOS-2	ALOS-3	ALOS-4
Data de Lançamento	24/01/2006 a 11/05/2011	24/05/2014	12/02/2023	03/2023
Situação Atual	Inativo	Ativo	Em desenvolvimento	Em desenvolvimento
Período De Revisita	46 dias	s.d.	35 dias	s.d.
Tempo de Vida Projetado	3 a 5 anos	3 a 5 anos	7 anos	7 anos
Instrumentos Sensores	PRISM, AVNIR-2 e PALSAR	PRISM, AVNIR-2 e PALSAR-2	s.d.	PALSAR-3 SPAISE3
Banda		L (23,6 cm comprimento)		

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2018) e JAXA (2022).

O satélite ALOS carrega consigo os sensores PRISM, AVNIR-2, PALSAR e PALSAR-2. O sensor PRISM (sigla para *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) possui uma banda pancromática de comprimento de onda entre 0,52 a 0,77 μm , resolução espacial de 2,5 metros, possui três telescópios que possibilitam a “formação de um triplet, ou seja, três imagens estereoscópicas superpostas de 35 km de largura sem que seja necessária varredura mecânica ou movimentação do satélite” (NOVO, 2008, p.195).

O sensor AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2) é adotado em mapeamentos temáticos em escalas de até 1:50.000, principalmente em mapeamentos de uso e cobertura da terra e monitoramento ambiental, de modo especial em regiões litorâneas e terras continentais. Possui quatro bandas (três, na faixa do visível e uma, na faixa do 30 infravermelho), com resolução espacial de 10 metros. Quanto às resoluções espectrais, a banda 1 vai de 0,42 a 0,5 μm , a banda 2 de 0,52 a 0,60 μm , a banda 3 varia de 0,62 a 0,69 μm , e a banda 4 infravermelho vai de 0,76 a 0,89 μm (TORRES, 2011).

O sensor PALSAR é um sensor de micro-ondas e opera na banda L, capaz de adquirir imagens diurnas ou noturnas e em qualquer condição atmosférica. Possui abertura sintética com resoluções espaciais variáveis, 10 a 100 metros, possui três

modos de aquisição de imagens: fino, ScanSAR e Polarimétrico. Seu produto é indicado para estudos geológicos, principalmente no imageamento em regiões de densa cobertura de nuvens, entre outros. Por ser um radar de abertura sintética, o PALSAR possui a opção de gerar imagens com as polarizações HH, VV, HV e VH. (TORRES, 2011; EMBRAPA, 2018). No Quadro 7 abaixo pode-se verificar algumas das características do sensor PALSAR.

Quadro 7 - Características do PALSAR

Modo de Operação	Polarização	Ângulo de incidência	Faixa Imageada (km)	Resolução transversal (m)
Fine Single	HH ou VV	8° - 60°	40 - 70	7 - 44
Fine Dual	HH+HV ou VV+VH	8° - 60°	40 - 70	14 - 88
ScanSAR	HH ou VV	18° - 43°	250 - 350	100
Polarimétrico	HH+VV+HV+VH	18° - 43°	20 - 65	24 - 89

Fonte: GOMES, 2007.

2.3.5.1.2 Sentinel

O Sentinel-1 é uma missão de satélite de radar de observação da Terra lançada pela Agência Espacial Europeia (ESA). O Sentinel-1 consiste em dois satélites, Sentinel-1A e Sentinel-1B, que compartilham o mesmo plano orbital com uma diferença de 180° na fase orbital. Cada satélite tem uma frequência de revisita de 12 dias e a frequência de revisita pode ser encurtada para 6 dias (YU *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2015). Sentinel-1 garante linhas de base espaciais reduzidas e linhas de base temporais curtas (até 12 dias) e, adicionalmente, tem um diâmetro de tubo orbital de cerca de 200 m (YU *et al.*, 2019; AHMAD e KIM, 2019), o que o torna apropriado para o monitoramento de deslocamentos lentos.

As imagens Sentinel são utilizadas para estudo e monitoramento de diversas áreas como de vegetação, solos, áreas costeiras, áreas marinhas e da qualidade do ar. O sensor SAR está a bordo dos quatro primeiros satélites da série Sentinel (1-A, 1-B, 2-A, 2-B). Combinados com outros dados de satélite, os dados do Sentinel-1 são amplamente usados no monitoramento terrestre, oceânico, atmosférico e ambiental, bem como na resposta a desastres e no monitoramento de mudanças na superfície da Terra.

O radar tem suporte para polarização de HH+HV, VV+VH e HH com uma resolução espacial de 5 metros e resolução radiométrica de 10 bits. O seu período de revisita favorece o monitoramento de desastres naturais, mapeamento de queimadas, atualização de mapas e dados cartográficos, entre outros (EMBRAPA, 2018). O Quadro 8 resume algumas das características dos satélites Sentinel.

Os dados SAR Sentinel-1A estão disponíveis gratuitamente e abertamente no hub de dados on-line Sentinel-1 da ESA (Torres *et al.*, 2012). O satélite Sentinel-1A tem quatro modos: IW (*Interferometric Wide swath*), EW (*Extra-Wide swath*), WV (*Wave Mode*), SM (Strip Map) que geram produtos SLC (Single Look Complex) (Chen *et al.*, 2018). O modo IW inclui três subfaixas, que podem ampliar a faixa da imagem para 250 km em uma resolução espacial mais alta.

Quadro 8 - Características dos satélites SENTINEL

SENTINEL	1A	1B	2A	2B	3A	3B	SP
Lançamento	03/04/14	22/04/16	23/06/15	07/03/17	16/02/16	25/04/18	13/10/17
Situação	Ativo	Inativo	Ativo	Ativo	Ativo	Ativo	Ativo
Período de Revisita	12 dias	12 dias	5 dias	5 dias	27 dias	27 dias	16 dias
Tempo de Vida Projetado	12 anos	12 anos	12 anos	12 anos	7 anos	7 anos	7 anos
Instrumentos Sensores	SAR	SAR	SAR e MSI	SAR e MSI	OLCI, SLSTR	OLCI e SLSTR	TROPOM I

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2018).

2.3.5.1.3 TerraSAR-X

O TerraSAR-X é o primeiro satélite radar a ser produzido por meio de parceria público-privada entre a *German Aerospace Center* (DLR) e a Europe's leading satellite specialist Astrium. O satélite possui um SAR, que opera na banda-X ($\lambda=3,1$ cm) e fornece imagens com resolução espacial nominal de até 1m. O TerraSAR-X possui três modos de aquisição: SpotLight, Stripmap e ScanSAR (PINTO, 2015).

O satélite TerraSAR-X é um satélite de radar de abertura sintética (SAR) alemão que foi lançado em 2007. Ele é capaz de capturar imagens de alta resolução da superfície da Terra, independentemente das condições climáticas e da iluminação solar. Ele é usado para uma variedade de aplicações, incluindo observação da Terra, mapeamento, monitoramento ambiental, defesa e segurança. Além disso, o TerraSAR-X é um satélite de observação comercial que oferece serviços de imagens de alta resolução para clientes em todo o mundo.

O TERRASAR-X possui um GPS de dupla frequência com uma unidade refletora que permite obter, com grande precisão, a posição em órbita do satélite, o que resulta num aumento da qualidade dos dados das imagens. Dentre as suas principais aplicações estão o monitoramento de áreas de segurança e defesa, preservação ambiental e de desastres naturais, planejamento e supervisão de redes de infraestrutura.

As imagens são em formato *Single Look Complex* – SLC com passagem descendente e tempo de revisita de 11 dias e datas para o período de imageamento de 2021-06-19 a 2022-06-28. Dentre as características dessa imagem SAR trabalhada têm-se: modo StripMap (30x50 km), com 3x3 metros de resolução espacial, 100 km² de Modelo Digital de Superfície WorldDEM, com 12 metros de resolução espacial. Os dados do TerraSAR-X são amplamente usados no monitoramento terrestre, oceânico, atmosférico e ambiental, bem como na resposta a desastres e no monitoramento de mudanças na superfície da Terra.

Os dados do sensor alemão também têm sido utilizados na detecção de deslocamentos superficiais, pois o curto tempo de revisita reduz a descorrelação temporal e espacial e minimiza possíveis problemas de desdobramento de fase. Em 2010, o programa lançou o satélite TanDEM-X que acompanha o TerraSAR-X a 200 metros de distância, foi planejado para criar um modelo de elevação digital global com resolução de um metro. O Quadro 9 apresenta as características principais dos dois satélites (WEGMULLER *et al.*, 2010; EMBRAPA, 2018).

Quadro 9 - Características dos satélites TerraSAR-X e TanDEM-X

Missão	TerraSAR-X	TanDEM-X
Lançamento	15/06/2007	21/06/2010
Situação Atual	Ativo	Ativo
Período de Revisita	11 dias	11 dias
Tempo de Vida Projetado	5 anos	5,5 anos
Instrumentos Sensores	SAR	SAR

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2018).

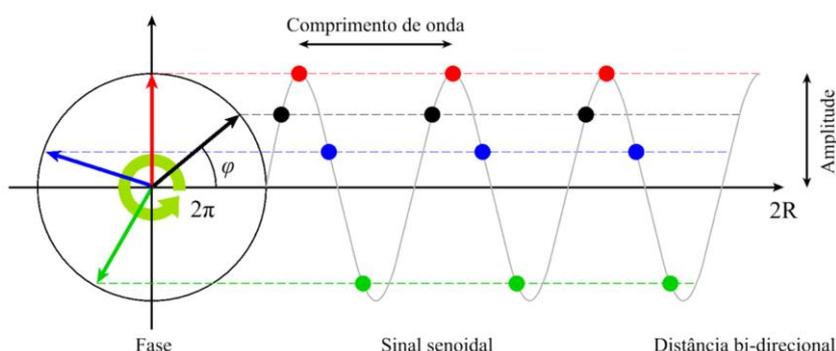
3 INTERFEROMETRIA POR RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (INSAR)

Este capítulo se propõe a uma conceituação teórica sobre o radar Interferométrico de Abertura Sintética (InSAR), destacando os conceitos básicos da tecnologia. Também são destacadas as principais técnicas de processamento de imagens SAR, evidenciando suas características fundamentais e formulações empregadas nos algoritmos para obtenção das informações de deslocamento.

3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS

O termo interferometria é proveniente da palavra interferência, que faz uso do princípio da superposição de ondas de qualquer tipo para expressar algum fenômeno e/ou propriedade estudada. Foi descrita pela primeira vez por Young (1803), demonstrando que a diferença de fase ($\Delta\varphi$) é a informação fundamental para a interferometria. A fase (φ) é uma grandeza física que representa o estágio do ciclo que a onda se encontra em um determinado instante, relacionando-se com a distância da fonte emissora. No sistema SAR cada sinal transmitido se assemelha a uma função senoidal do tipo $\text{sen}(\varphi)$ (Figura 16).

Figura 16 – Relação da fase e comprimento de onda com a distância inclinada.



Fonte: Ferretti *et al.* (2007).

No caso de um alvo situado a uma distância r em relação ao SAR, a fase do sinal de retorno é dada pela (5, sendo o termo de 4π relacionado a distância inclinada (R) de ida e retorno do sinal (FERRETTI *et al.*, 2007):

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (5)$$

A técnica de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR) foi utilizada pela primeira vez para produzir Modelos Digitais de Elevação (MDE) altamente precisos e obtidas independentemente das condições climáticas, por meio da informação da diferença de fase entre duas imagens, tornando-se um grande avanço para a comunidade científica (GRAHAM *et al.*, 1974).

A InSAR é aplicada para compreender as mudanças do relevo natural da crosta terrestre e dos seus elementos ao longo do tempo (MURA, 2000; GABOARDI, 2003), utilizando no mínimo um par de imagens SAR de formato completo (*Single-Look Complex* – SLC) para gerar uma terceira imagem complexa, denominada imagem interferométrica, onde a fase de cada pixel é formada pela diferença de fase entre os pixels correspondentes nas duas imagens originais (PARADELLA, MURA, GAMA; 2021).

A seguir estão apresentados conceitos importantes sobre a utilização das imagens SAR – fase e coerência interferométrica; bem como o avanço de novas técnicas de processamento da InSAR por meio de tecnologias computacionais e algoritmos avançados.

3.2 FASE INTERFEROMÉTRICA

O SAR emite uma radiação que atinge os espalhadores no alvo e retorna ao sensor para gerar a imagem. A transmissão e a recepção da radiação em alvos com diferentes distâncias do radar resultam em um atraso que causa uma alteração de fase entre os sinais. A partir de técnicas de processamento é possível calcular a intensidade e a fase do sinal retroespalhamento de cada célula de resolução do solo (ULABY, 1982; ESA, 2007; GAMA *et al.*, 2013).

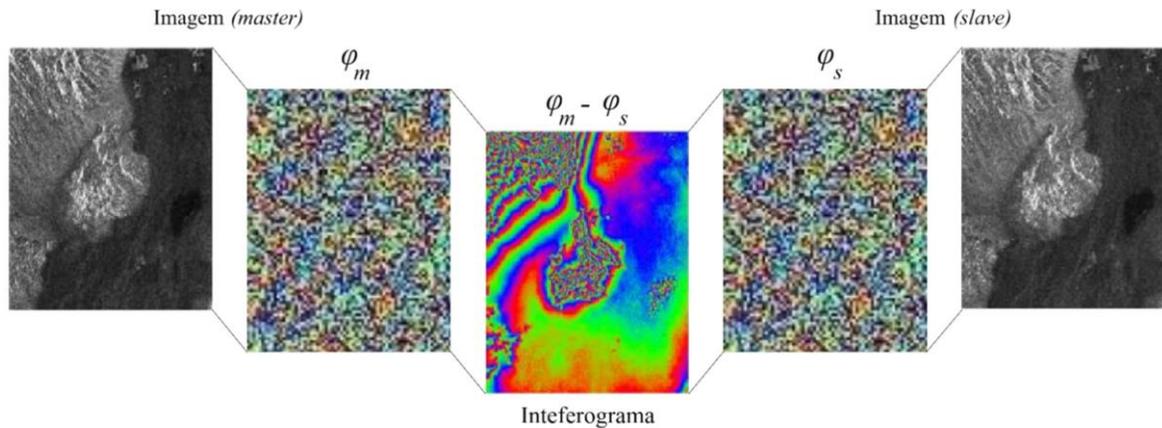
De acordo com geometria de aquisição, a diferença de fase ($\Delta\varphi$) entre duas imagens complexas pode ser obtida através da (6 (BAMLER; HARTL, 1998):

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi(R_2 - R_1)}{\lambda} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin(\theta)} h \quad (6)$$

A diferença de fase entre pixels de posições correspondentes em duas imagens, denominada interferograma (Figura 17), está relacionada à diferença de distância

entre as duas trajetórias durante as aquisições; ao conhecimento acerca da posição do sensor no momento das aquisições; ao comprimento da linha de base; à altura do alvo na superfície e ao comprimento de onda do sistema sensor, tornando possível reconstruir a geometria do sistema SAR no momento das aquisições (RAMOS, 2013).

Figura 17 – Geração de interferograma



Fonte: Taylor *et al.* (1999).

A diferença de fase do interferograma não representa apenas a superfície topográfica e o deslocamento superficial, mas também a atmosfera e aos ruídos, correspondendo ao somatório de todas essas componentes (7) (MOHR; MADSEN, 1999):

$$\Delta\varphi = \varphi_{deformação} + \varphi_{topografia} + \varphi_{atmosfera} + \varphi_{ruídos} + \varphi_0 \quad (7)$$

Sendo:

- $\varphi_{deformação}$ a diferença de fase provocada pelo deslocamento da superfície entre as aquisições ((8), onde R_{def} o deslocamento do alvo em relação a LoS ocorrida entre as duas aquisições SAR.

$$\varphi_{deformação} = \frac{4\pi}{\lambda} R_{def} \quad (8)$$

- $\varphi_{topografia}$ a é a componente relativa à topografia, que depende da linha base (9).

$$\varphi_{topografia} = 2\pi \frac{h}{h_a} \quad (9)$$

Onde h é a altura do alvo e h_a é a altura de ambiguidade da fase. A altura de ambiguidade (h_a) é definida como a diferença de altura que gera na

fase interferométrica uma mudança de 2π (MASSONNET *et al.*, 1993), segundo a (10).

$$h_a = \frac{\lambda r \sin(\theta)}{2 B_{\perp}} \quad (10)$$

Sendo r a distância entre o sensor e o alvo e B_{\perp} a projeção da linha de base perpendicular na linha de visada do sensor SAR 1 (Figura 14).

- $\varphi_{atmosfera}$ é a componente atmosférica. O atraso da fase atmosférica é devido às flutuações da composição da atmosfera entre o satélite e o alvo durante as distintas aquisições (GOLDSTEIN, 1995).
- $\varphi_{ruídos}$ existem alguns ruídos que precisam ser modelados e removidos, são eles: a decorrelação devido à linha de base, decorrelação temporal, erro no registro das imagens; ruído térmico; ruído Speckle e erros introduzidos pelo processamento SAR (MURA, 2011).
- φ_0 corresponde a posição relativa da trajetória do satélite. Pode ser modelada e removida utilizando dados orbitais.

3.3 COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA

A coerência interferométrica mensura a correlação de fase entre os pixels de uma imagem de referência (*master*) com uma imagem repetição (*slave*) (SABATER *et al.*, 2011). Em uma situação ideal do processamento interferométrico SAR, a diferença de fase obtida está relacionada com a diferença de percurso do sinal. Porém, os ruídos existentes no processo de emissão e de captação das ondas afetam a fase, interferindo na qualidade do interferograma.

Segundo Hanssen (2001) a viabilidade da técnica InSAR depende da alta coerência interferométrica, sendo calculada pelo módulo do coeficiente de correlação complexo ((11) (JUST; BAMLER, 1994; ZHOU *et al.*, 2009):

$$\gamma = \left| \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_1(i,j) C_2(i,j)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_1(i,j) C_1(i,j)^*} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_2(i,j) C_2(i,j)^*}} \right|, 0 \leq |\gamma| \leq 1 \quad (11)$$

Sendo:

- C_1 e C_2 : representam, respectivamente, uma imagem de referência e uma imagem repetição;
- $C(i, j)$: é o valor complexo do pixel (i, j) , onde i representa a direção em range e j a direção em azimuth;
- $C(i, j)^*$: é o complexo conjugado de $C(i, j)$;
- N : representa o número de pixels na direção em range; e
- M : é o número de pixels na direção em azimuth.

A imagem de coerência está relacionada ao desvio-padrão da fase interferométrica, permitindo avaliar se as duas imagens SAR são apropriadas para o processamento interferométrico. Com isso, altos valores de coerência demonstram estabilidade das fases, representando uma similaridade nas características da energia retroespalhada no alvo da superfície nas duas passagens da antena pelo mesmo local. Uma imagem de coerência normalmente tem a magnitude de seus pixels estabelecida entre 0 e 1 (VICTORINO, 2016).

De acordo com Rebelo (2007), três situações podem ser derivadas da análise de uma imagem de coerência:

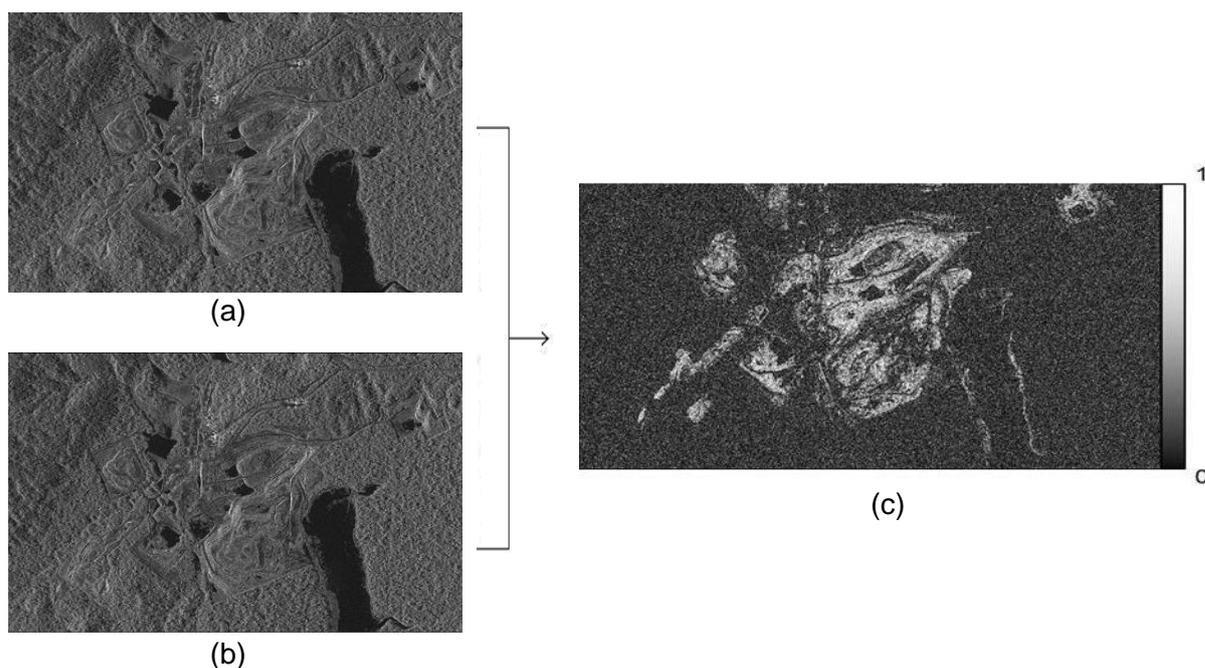
- Valores entre 0 e 0,2 – indicam imagens que não constituem informação útil para a geração do interferograma, ou seja, representam uma baixa correlação entre pixels análogos nas duas imagens;
- Valores entre 0,2 e 0,5 – apontam imagens que podem ser utilizadas para geração de interferograma, no entanto com alta presença de ruídos; e
- Valores de coerência superiores a 0,5 – revelam uma alta qualidade do interferograma, recomendada para a estimativa de altitudes.

Imagens de coerência podem ser utilizadas para proporcionar a seleção de imagens mais adequadas à aplicação de técnicas interferométricas, pois são facilmente interpretáveis (Figura 18):

- Áreas claras na imagem, bastante iluminadas, com níveis de cinza próximos do branco, apresentam elevada correlação do par, relacionados a regiões com baixa vegetação, tais como, solo exposto, afloramentos rochosos ou regiões desérticas; e

- Áreas escuras nas imagens, com tonalidades próximas do preto indicam regiões pouco correlacionadas normalmente ruidosas, ou seja, com baixa coerência, e, portanto, impróprias para aplicação de técnicas interferométricas.

Figura 18 – Imagens SAR da Mina do Manganês do Azul: (a) imagem de referência (*master*); (b) imagem repetição (*slave*); (c) Imagem de coerência interferométrica. As porções escuras da imagem representam a Floresta Amazônica (baixa coerência) e as em branco a área da Mina do Manganês do Azul (alta coerência).



Fonte: Victorino (2016).

3.4 FONTES DE ERROS

O interferograma fornece a informação da fase relativa a 2π , não representando o número total de ciclos completos ($2\pi n$) do comprimento de onda, visto que o interferograma pode conter vários ciclos 2π (HANSSEN, 2001). Para remover essa ambiguidade, utiliza-se o processo de desdobramento da fase (*phase unwrapping*), que consiste na reconstrução da fase interferométrica original, determinando a fase absoluta (desdobrada) do interferograma.

Os erros no desdobramento de fase são um obstáculo na análise do interferograma (ZEBKER, 1992), e são causados principalmente pela imprecisão do registro, pela presença do ruído speckle e pela perda de coerência (descorreção) (HUANG, 1996).

A imprecisão do registro das cenas interfere no padrão das franjas do interferograma. Com isso, um registro incorreto provoca um interferograma mais ruidoso. Destaca-se que este ruído não pode ser removido através da aplicação de filtros, assim, o registro preciso das imagens é um passo crucial no processamento interferométrico (HUANG, 1996; PINTO, 2015).

O speckle é considerado um ruído multiplicativo, inerente a natureza coerente de uma imagem SAR, que reduz a precisão do desdobramento de fase e pode aparecer como erros no interferograma. O ruído speckle pode ser reduzido pela utilização de filtros ou pelo processamento multi-look (GOLDSTEIN *et al.*, 1988; PARADELLA, MURA, GAMA; 2021).

A perda de coerência entre imagens SAR de uma área comum adquiridas em momentos diferentes, pode ser atribuída a três fatores principais (NIEVINSKI, 2004; VICTORINO, 2016):

- **Descorrelação Temporal:** provoca a mais severa perda de coerência, pode ser causada por qualquer mudança ambiental entre os dois registros SAR que formam o interferograma. É motivada, por exemplo, pelo aumento ou mesmo movimento/remoção da vegetação e de neve, erosão do solo, regiões de seca. Provocando o deslocamento não-coerente dos dispersores, alterando a fase e causando uma perda de coerência entre as aquisições;
- **Descorrelação Geométrica:** indica uma mudança significativa no comprimento da linha de base espacial entre duas imagens SAR. Ocasiona alterações no ângulo de incidência e provoca diferenças geométricas, levando a descorrelação do sinal eletromagnético; e
- **Efeitos Atmosféricos:** as alterações no comportamento da atmosfera devido às condições de refração do ambiente, contribuem para atrasar a propagação do sinal de radar. Dentre os efeitos atmosféricos, pode-se citar: umidade, pressão atmosférica e temperatura, bem como à presença de vapor de água na ionosfera e na troposfera.

A presença dos erros descritos afeta a medição da diferença de fase e dificulta a determinação do valor de deslocamentos de forma assertiva. Logo, no processamento de dados com a técnica InSAR, deve-se buscar eliminar e/ou reduzir

essas incongruências. Na sequência serão abordadas algumas técnicas de processamento de imagens, considerando os principais aspectos conceituais e uma breve conceituação sobre as metodologias;

Um aspecto relevante, com relação a minoração dos efeitos provocados pela decorrelação temporal, é a definição de pontos de controle na superfície imageada. Curlander e McDonough, (1991), apresentaram uma das formas mais eficientes para determinação do *offset* da fase interferométrica, que consiste em um refletor de canto, cuja forma mais comum é o triedro triangular (Figura 19).

Figura 19 – Geometria de refletores de canto

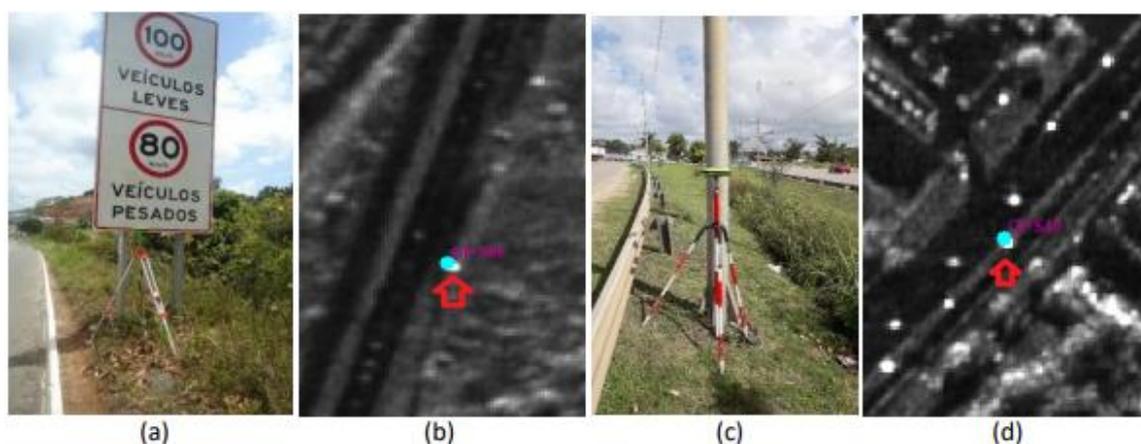


Fonte: Passos e França (2018).

Correia (2011) chama atenção para o fato de que o emprego de refletores, pode ser usado apenas como pontos de controle planialtimétricos, servindo como ferramentas de georreferenciamento. Tendo em vista, o surgimento de novos métodos para mensurar a relação de fase interferométrica, como o método de calibração desenvolvido por Mura (2000), denominado de autocalibração, que tem por finalidade a determinação automática do *offset* da fase interferométrica sem o uso de refletores.

Como alternativa a instalação de pontos de controle como refletores de canto, os autores Silva, Coutinho e Rosa (2021) apresentam estudo de validação de dados posicionais sobre dados InSAR, considerando análises estatísticas. No estudo os autores empregam objetos metálicos como placas de trânsito e também postes de iluminação (Figura 20), para aumentar o nível de reflexão de sinal nos *pixels* das imagens. Os autores destacam por meio dos resultados que segundo as classificações utilizadas, esses objetos podem ser usados como pontos de controle, podendo servir como instrumentos de validação de dados nas ortofotos.

Figura 20 – Pontos de controle posicional: (a) placas de transito com estação GNSS; (b) reflexão do ponto na ortoimagem; (c) poste de iluminação com estação GNSS e (d) reflexão do ponto na ortoimagem



Fonte: Silva, Coutinho e Rosa (2021).

3.5 INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR (DInSAR)

A DInSAR é uma técnica clássica e pioneira de sensoriamento remoto para detecção de alterações da superfície (deformação) – causado, por exemplo, por terremotos, deslizamentos, subsidência; em relação a direção da linha de visada do satélite (SANSOSTI *et al.*, 2014).

Gabriel, Goldstein e Zebker (1989) foram os primeiros a aplicar a DInSAR para localizar pequenos movimentos (magnitude ≤ 1 cm) da elevação superficial de grandes regiões (faixas de 50 km), oriundos de eventos sísmicos, via imagens SAR do Seasat. Posteriormente, tornou-se mais popular no início dos anos 90 com os estudos de Goldstein *et al.* (1993) e Massonnet *et al.* (1993).

De maneira simplificada, a técnica DInSAR baseia-se no cálculo, em uma base pixel-a-pixel, da diferença de fase relativa a, no mínimo, um par de imagens SAR, adquiridas em diferentes épocas e posição do satélite ((12), sendo d o deslocamento relativo na direção da linha de visada do radar.

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (12)$$

Partindo do princípio que a refletividade do alvo e o comportamento da atmosfera são constantes nas aquisições analisadas, e que o ruído do sistema é desprezível, os valores de fase de um interferograma serão proporcionais ao deslocamento do alvo entre as duas aquisições. Assim, o interferograma gerado, a partir, por exemplo, deste

par de imagens SAR, têm componentes de fase topográfica (φ_h) – relacionadas a altitude do terreno (h); de fase devido à deformação no solo (φ_{desl}) – relacionada com o deslocamento do pixel em LOS provocado por mudança do terreno (d_{desl}); de fase atmosférica (φ_{atm}) – atraso e/ou perturbação na atmosfera; de fase residual devido aos erros de órbita (φ_β), e de ruídos do sistema e speckle (φ_η), podendo ser representados pela (13):

$$\Delta\varphi = \varphi_h + \varphi_{desl} + \varphi_{atm} + \varphi_\beta + \varphi_\eta$$

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi B_\perp}{\lambda R_1 \sin(\theta)} h + \frac{4\pi}{\lambda} d_{desl} + \varphi_{atm} + \varphi_\beta + \varphi_\eta \quad (13)$$

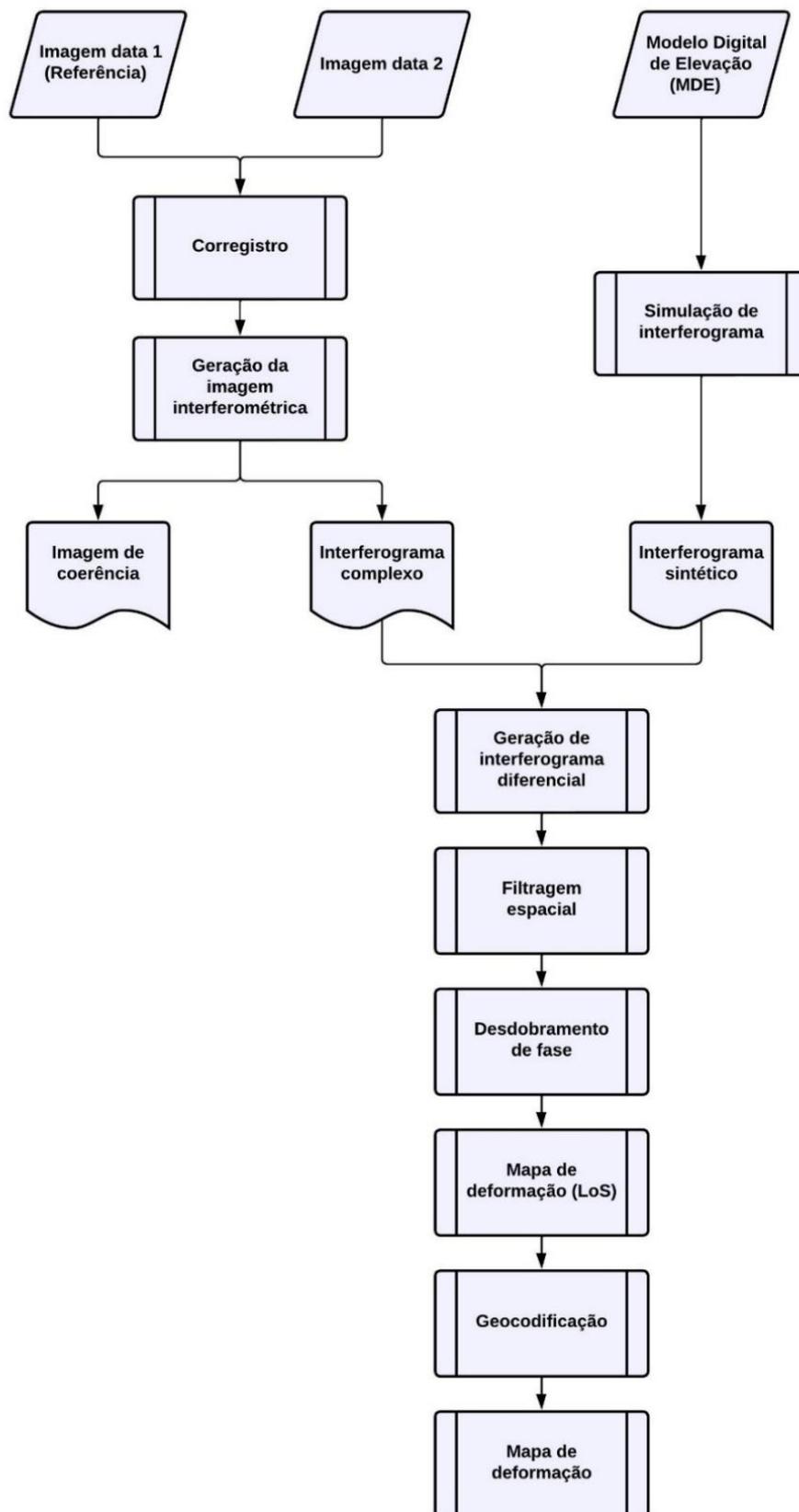
É importante destacar que a técnica DInSAR clássica emprega normalmente um MDE de boa precisão para que seja simulada uma fase correspondente ao MDE na geometria de aquisição do sensor SAR. A fase do MDE (φ_h) pode ser descontada de $\Delta\varphi$, resultando em uma fase interferométrica diferencial ($\Delta\varphi_{di}$) dada por ((14):

$$\Delta\varphi_{di} \cong \frac{4\pi}{\lambda} d_{desl} + \varphi_{atm} + \varphi_\beta + \varphi_\eta \quad (14)$$

Os erros induzidos pelas componentes de fase atmosférica (φ_{atm}), fase residual devido aos erros de órbita (φ_β), e de ruídos do sistema e *speckle* (φ_η) são desconsiderados na técnica DInSAR, pois é preciso uma análise estatística de uma série temporal de imagens para compreensão dessas componentes de fase (PARADELLA, MURA, GAMA, 2021). Devido a isso, a aplicação da DInSAR é limitada a detecção de deformação na ordem centimétrica a métrica, sendo recomendada para analisar variações superficiais significativas.

A Figura 21 apresenta o fluxograma de desenvolvimento da técnica DInSAR no *software GAMMA Remote Sensing*.

Figura 21 – Fluxograma de desenvolvimento da técnica DInSAR



Fonte: Victorino (2016).

3.6 INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR AVANÇADA (A-DInSAR)

A partir das limitações da técnica DInSAR, foram desenvolvidas uma série de técnicas que utilizam o processamento de diversas aquisições SAR para a detecção e a construção de séries temporais de sinais com retroespalhamento semelhante ao de alvos pontuais, melhorando a acurácia, a cobertura de abrangência e a capacidade de detectar mudanças temporais dos fenômenos de deformação de superfície.

Essas técnicas fazem parte do grupo nomeado como Interferometria Diferencial SAR Avançada (A-DInSAR), podendo ser destacadas:

- Interferometria por Espalhadores Persistentes SAR (PSInSAR) – Ferretti *et al.*, (2000) e Ferretti *et al.* (2001);
- Small Baseline Subset (SBAS) – Berardino *et al.* (2002); e
- Tecnologia SqueeSAR – Ferretti *et al.* (2011).

Essas técnicas fazem uso de muitos cenas, no mínimo 15, possibilitando filtrar as componentes de fase indesejáveis (descorrelação) e modelar o monitoramento dos fenômenos de deformação da superfície com uma precisão de centímetros a milímetros, utilizando, em sua grande maioria, sensores nas bandas C e X (MACEDO *et al.*, 2011; MURA, 2013; GAMA *et al.*, 2013).

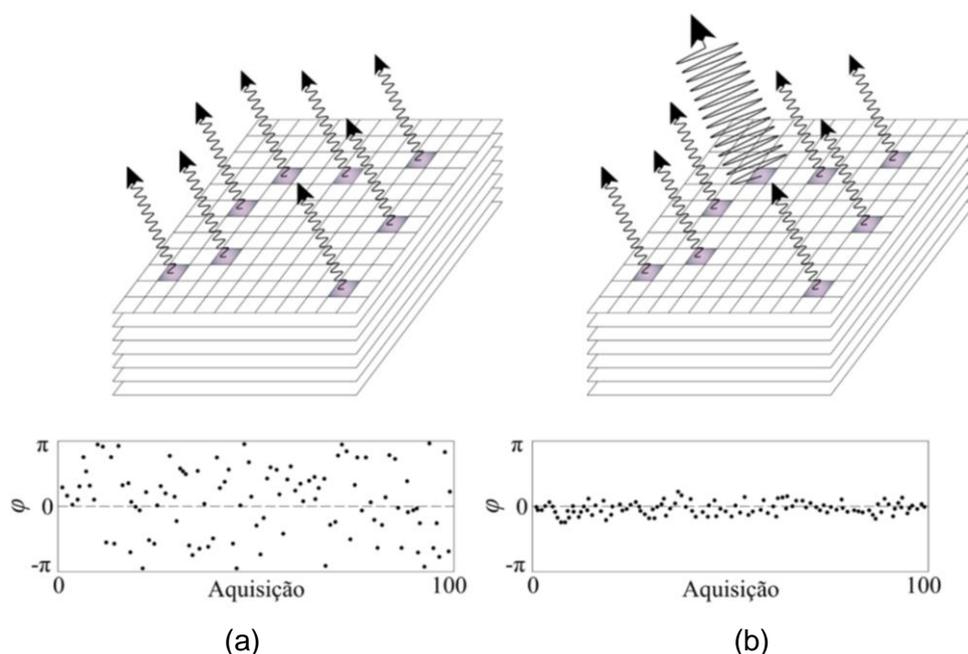
3.6.1 Interferometria por Espalhadores Persistentes SAR (PSInSAR)

A técnica Interferometria por Espalhadores Persistentes (PSI – *Persistent Scatterer Interferometry*) foi elaborada buscando melhorar a detecção de deformação de área de baixa coerência interferométrica e a remoção das componentes da fase atmosférica (PARADELLA, MURA, GAMA, 2021). Sendo originalmente desenvolvida pelo grupo de pesquisa de sistemas SAR do Instituto Politécnico de Milão (POLIMI), na Itália, com o nome *Permanent Scatterer Interferometry* (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 2000; 2001; COLESANTI *et al.*, 2003).

A técnica Interferometria por Espalhadores Persistentes SAR (PSInSAR) é baseada na análise de espalhadores persistentes (*Permanent Scatterer*, PS) que representam alvos com a característica de refletirem energia durante todo o período de análise, ou seja, possuem fase estável, sendo visíveis na pilha de imagens (mais

que 15 cenas SAR), independentemente da posição das órbitas do satélite durante a série temporal estudada (Figura 22). Assim, é possível identificar pixels com a coerência interferométrica maior. Esse tipo de alvo são tipicamente estruturas geométricas funcionando como refletores de canto – postes e placas das ruas, torres de transmissão, edifícios, pontes, dutos expostos, estruturas de telhado; e estruturas naturais – afloramentos de rochas, encostas (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 1999; PARADELLA, MURA, GAMA, 2021).

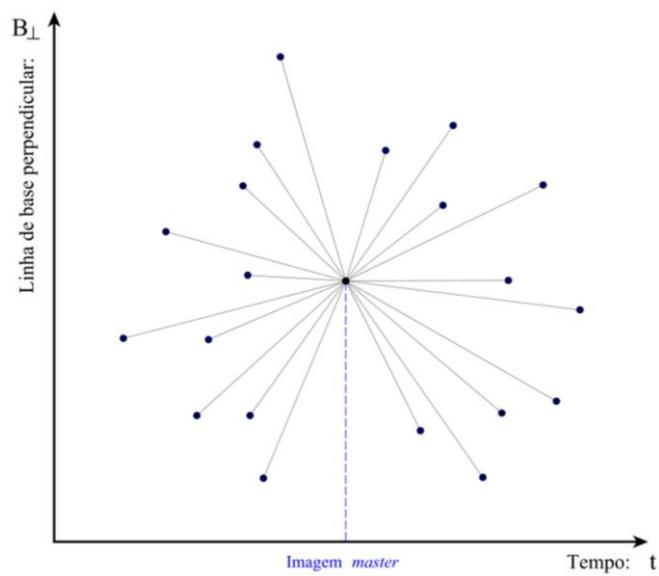
Figura 22 – Ilustração do comportamento da fase para: (a) pixel com espalhadores distribuídos; (b) pixel com espalhadores persistentes (coerentes)



Fonte: Hooper (2006).

A partir da identificação, na pilha de imagens SAR analisada, dos pixels mais estáveis e com baixo nível de ruído, ou seja, espalhadores persistentes, é realizada a seleção das imagens para formar o conjunto de interferogramas. Posteriormente, o processamento da pilha de interferogramas é realizado a partir da escolha da imagem de referência (*master*), que é definida como a cena localizada no centro da série temporal analisada, a fim de maximizar a coerência do conjunto de interferogramas (Figura 23) (HOOPER *et al.*, 2004). Assim, resumidamente, as principais características de PSInSAR se referem a utilização de apenas imagens com pixels PS e o emprego de um único conjunto de interferogramas diferenciais referentes à imagem *master*.

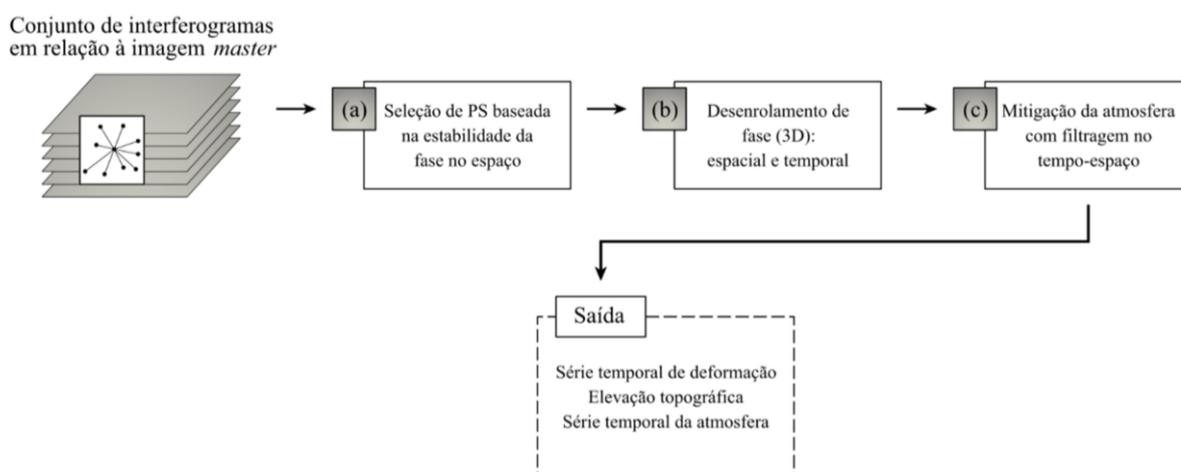
Figura 23 – Exemplo da configuração do método PSInSAR.



Fonte: Souza (2022).

Após o desenvolvimento da primeira técnica PSI proposta por Ferretti, Prati e Rocca (1999), foram elaborados diversos algoritmos com conceitos comparáveis em que o termo PSI. Mas, apesar dos detalhes desses algoritmos serem distintos quanto à implementação, todos eles contêm três blocos principais de processamento (Figura 24): seleção coerente de pixels; desenrolamento de fase 3D (espaço-temporal); e mitigação do sinal atmosférico. Essas etapas podem ser aplicadas de forma combinada, independente ou iterativa em diferentes usos de PS (SOUZA, 2022).

Figura 24 – Fluxo genérico de processamento PSInSAR



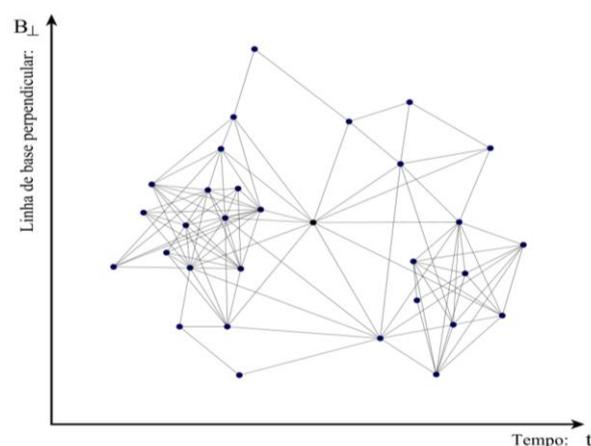
Fonte: Samiei-Esfahany (2017).

3.6.2 Small Baseline Subset (SBAS)

A técnica *Small Baseline Subset* (SBAS), desenvolvido por Berardino *et al.* (2002), faz o uso da abordagem que detecta e analisa deformações da superfície da terra ao longo do tempo, surgindo paralelamente ao desenvolvimento de metodologias PSI. Baseada em vários subgrupos de linhas de base curtas das séries de interferogramas analisados, a partir de uma escolha adequada de pares de imagens SAR (Figura 25).

Os pares de imagens SAR caracterizam-se por uma pequena separação espacial e temporal entre as órbitas de aquisição, aumentando a amostragem temporal devido ao uso de todas as cenas SAR dos diferentes subgrupos das pequenas linhas de base e preservando a capacidade do sistema (BERARDINO *et al.*, 2002; LANARI *et al.*, 2007; GAMA *et al.*, 2015).

Figura 25 – Exemplo da configuração do método SBAS

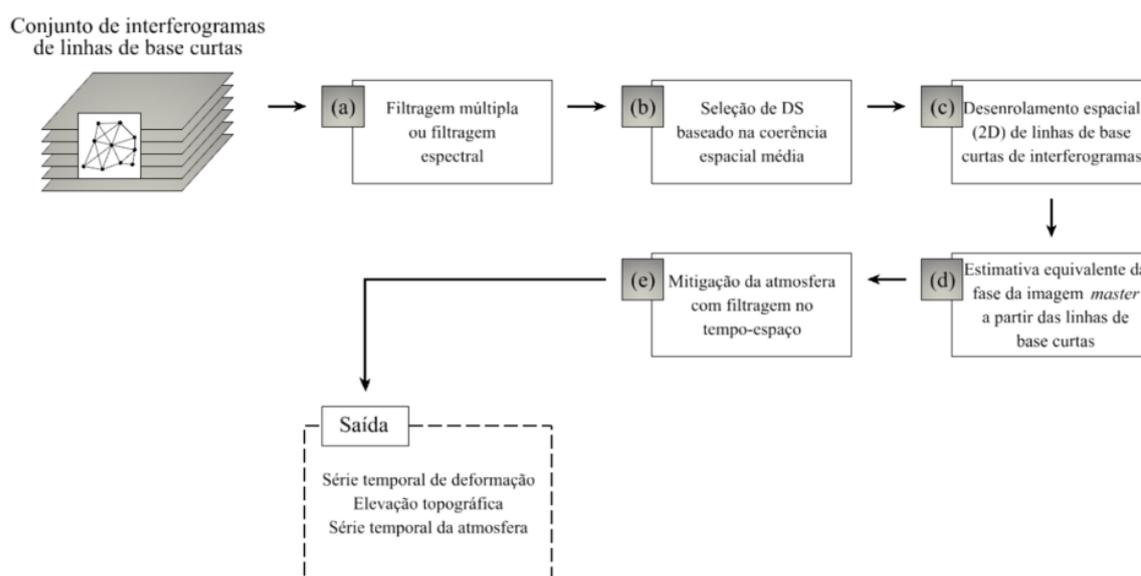


Fonte: Souza (2022).

A metodologia SBAS agrupa vários subgrupos de pequenas linhas de base de séries dos interferogramas para com o objetivo geral de reduzir os ruídos do sinal, a decorrelação geométrica provocada pela separação orbital entre as cenas SAR, os erros topográficos, melhorando, conseqüentemente, a coerência entre os interferogramas (LANARI *et al.*, 2004). Além disso, a técnica utiliza alvos denominados de espalhadores distribuídos (*Distributed Scatterer*, DS), que estão relacionados, por exemplo, a áreas rochosas, a áreas desérticas e a locais com pouca vegetação, com emprego do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Obtendo, assim, uma amostragem espacial e temporal maior quando comparada o método PSI.

A abordagem proposta por Berardino *et al.* (2002) foi incorporada em outros algoritmos com processo metodológicos semelhantes. Porém, têm em comum cinco etapas principais de processamento (Figura 26): filtragem; seleção coerente de pixels; desenrolamento espacial (2D) de linhas de base curtas de interferogramas; estimativa equivalente da fase da imagem *master* a partir das linhas de base curtas; e mitigação do sinal atmosférico (SOUZA, 2022).

Figura 26 – Fluxo genérico de processamento SBAS



Fonte: Samiei-Esfahany (2017).

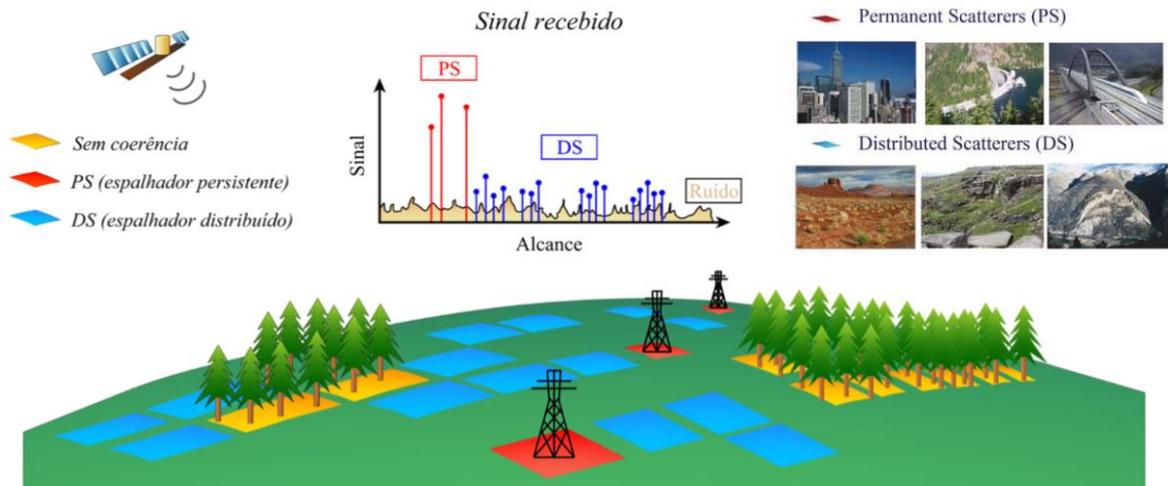
3.6.3 Tecnologia SqueeSAR

O algoritmo denominado de SqueeSARTM, desenvolvido por Ferretti *et al.* (2011) e patenteado pela empresa TRE-Altamira, é um método híbrido que incorpora na técnica PSI o conceito de espalhadores distribuídos (*Distributed Scatterer*, DS), que são pixels de áreas extensas caracterizados por retroespalhamento menos intensos que os dos espalhadores persistentes (*Permanent Scatterer*, PS), mas estatisticamente homogêneos (Figura 27) (PARADELLA, MURA, GAMA, 2021; SOUZA, 2022).

Os DS representam basicamente regiões sem grande cobertura vegetal, onde a densidade de PS tende a ser baixa ou ausente. Com a aplicação da técnica SqueeSAR é possível detectar deslocamentos em áreas com DS com a mesma acurácia das análises com PS, resultando na melhora da densidade e da qualidade

de alvos de medição quanto à deformação superficial, com aplicação relevante para áreas não urbanas (PARADELLA, MURA, GAMA, 2021; SOUZA, 2022).

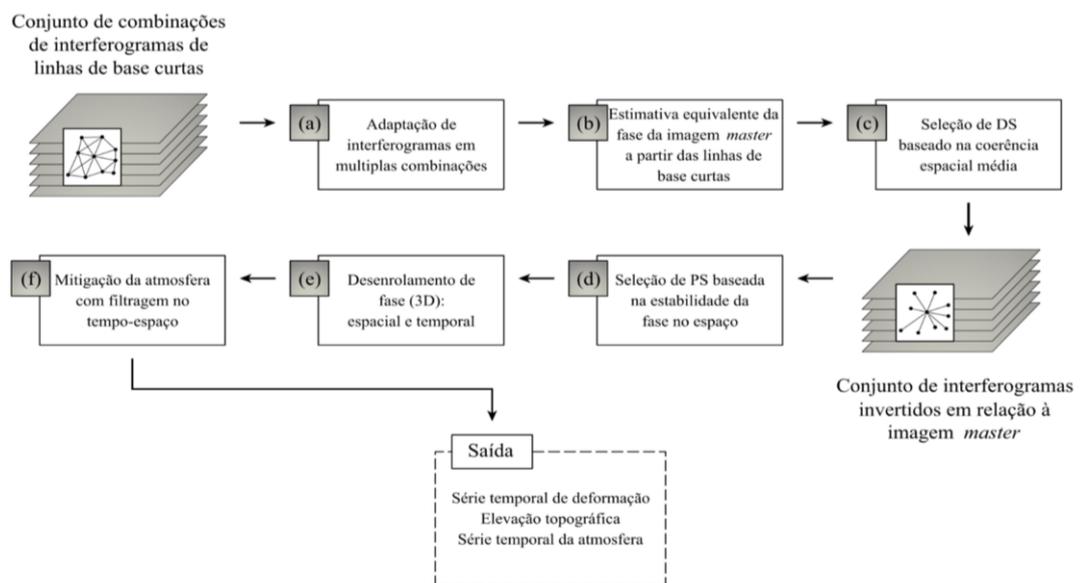
Figura 27 – Tipos de alvos e classificações segundo seu uso em SqueeSAR



Fonte: Adaptado de Ferretti (2014).

A Figura 28 representa o fluxograma genérico de aplicação do algoritmo SqueeSAR. O processo para determinar os alvos DS consiste em aplicar um filtro adaptativo que preserve os PS e que seja capaz de calcular a média de pixels estatisticamente homogêneos. Dessa forma, o SqueeSAR se traduz em uma técnica avançada para detectar deslocamentos superficiais precisos em áreas urbana e/ou rural (SOUZA, 2022).

Figura 28 – Fluxo genérico de processamento SqueeSAR



Fonte: Ferretti *et al* (2011); Samiei-Esfahany (2017).

Como síntese das informações apresentadas, os autores Gama *et al.*, (2013), conceberam o Quadro 10, que reúne informações relacionadas as técnicas de processamento anteriormente descritas. Os autores elegeram as principais características de cada uma delas e apresentam aspectos relevantes de forma síntese.

Quadro 10 – Comparativo entre as principais técnicas InSAR

Técnica	Principais Características
DInSAR	Interferometria com modelo de elevação digital (DEM) removido; Informação qualitativa, distribuída em deformação do solo; Gravemente afetado por efeitos atmosféricos e de ruído; Não prevê nenhuma série temporal;
PSInSAR	Explora alvos terrestres estáveis – Espalhadores Permanentes (PS); Estima efeitos atmosféricos e sua remoção; Provê uma série temporal; Não provê medidas de espalhadores homogêneo distribuídos (DS); Necessita de pelo menos 20 imagens;
SqueeSAR	Explora alvos terrestres estáveis – Espalhadores permanentes (PS); Provê medidas de espalhadores homogêneos distribuídos (DS); Estima efeitos atmosféricos e sua remoção; Provê uma série temporal; Necessita de pelo menos 20 imagens;
SBAS	Explora alvos terrestres estáveis – Espalhadores Permanentes (PS); Estima efeitos atmosféricos e sua remoção; Provê uma série temporal; Não provê medidas de espalhadores homogêneos distribuídos (DS); Necessita de pelo menos 8 imagens;

Fonte: Gama *et al.* (2013).

3.7 SOFTWARES PARA PROCESSAMENTO DE IMAGENS SAR

Os softwares de processamento de imagens SAR (Radar de Abertura Sintética) são ferramentas essenciais para a análise e interpretação de dados obtidos por radar de abertura sintética. Esses softwares permitem a manipulação de dados brutos coletados por sensores SAR, aplicando algoritmos de processamento para gerar imagens georreferenciadas.

O processamento, também permite simular imagens SAR com base em modelos digitais de terreno, o que pode ser útil para planejar missões de coleta de dados ou para avaliar a qualidade de dados coletados em diferentes condições. Na sequência (Figura 12) é apresentado um resumo dos principais Softwares comerciais e abertos, que podem ser empregados no processamento de imagens.

Quadro 11 – Principais *softwares* para processamento de imagens SAR

	Software	Licença	Companhia/ Universidade	Web Site	Satélites Suportados (sensores)						
					ERS	Env	Rad	Alo	Jer	Tsx	csm
Capacidades DinSAR	Doris	Público	TUDelft	http://doris.tudelft.nl/	x	x	x	x	x	x	x
	ROI_PAC	Público	<i>University of Berkeley</i>	http://www.roipac.org/	x	x	x	x	x	x	
	NEST	Público	<i>ESA + International consortium</i>	http://nest.array.ca/web/nest or http://www.ppolabs.com/nestdoris.html	x	x	x	x	x	x	x
	Adore_doris	Público	<i>University of Miami</i>	http://code.google.com/p/adore-doris/	x	x	x	x	x	x	x
	π _rate	Público	<i>University of Leeds</i>	http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earhw/pirate/	x	x	x	x	x	x	x
	RAT	Público	<i>TUBerlin</i>	http://radartools.berlios.de/	x	x		x			
	GMTSAR	Público	<i>University of California</i>	http://topex.ucsd.edu/gmtsar/	x	x		x			
	Diapason	Comercial	CNES	http://www.altamira-information.com	x	x	x	x	x		
	Imagine SAR	Comercial	ERDAS/DLR	http://geospatial.intergraph.com/products/erdasimagine/imagineradarmappingsuite/Details.aspx	x	x	x	x	x	x	x
EarthView	Comercial	MDA	www.mdacorporation.com	x	x	x	x	x			
Capacidades DinSAR + MTI	SarScape (ENVI)	Comercial	SARMAP	http://www.sarmap.ch/	x	x	x	x	x	x	x
	Gamma	Comercial	<i>Gamma Remote Sensing</i>	http://www.gamma-rs.ch/	x	x	x	x	x	x	x
	StaMPS-MTI	Público	TUDelft	http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps	x		x	x	x	x	x
	DePSI	Público	TUDelft	www.tudelft.nl/hanssen (for contacting)	x	x	x	x	x	x	x
	Sarproz	Público	<i>University of Hong Kong (Daniele Perissin)</i>	http://ihome.cuhk.edu.hk/~b122066/manual/index.html	x	x	x	x	x	x	x

Fonte: Adaptado de Sousa *et al.* (2013).

4 METODOLOGIA

Este capítulo aborda a metodologia empregada no trabalho, descrevendo as características do tipo de pesquisa, bem como as etapas estruturadas para concepção do estudo. São apresentados conceitos sobre o tipo de pesquisa realizada bem como as análises propostas para o delineamento da pesquisa como um todo.

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A metodologia empregada neste trabalho compreende um sistema híbrido, com levantamento bibliográfico e pesquisa bibliométrica, que constituem a sistematização de um conjunto de fases e de etapas, com o objetivo de compreender, investigar e apresentar as aplicações da tecnologia InSAR no monitoramento geotécnico.

De início foi realizado um levantamento bibliográfico, com o objetivo compreender o problema proposto e auxiliar na construção de hipóteses e fundamentação teórica do estudo. Para Pizzani *et al.*, (2012, p. 54), a pesquisa bibliográfica pode ser entendida como “[...] a revisão de literatura sobre as principais teorias que norteiam o trabalho científico”.

Os métodos de sistematização de literatura vêm ganhando espaço em diversas áreas do conhecimento. Uma vez que, no processo de pesquisa bibliográfica pode ocorrer subjetividade nas informações. Na visão de Pluye; Hong, (2014), as revisões sistemáticas apoiam a produção de diretrizes para facilitar a tomada de decisão com base em evidências e fornece uma justificativa baseada em fatos, corroborando com a elaboração de trabalhos e desenvolvimento de uma determinada temática.

Sendo assim, a investigação foi dividida em duas etapas, levantamento bibliográfico e pesquisa bibliométrica. O levantamento bibliográfico serviu de suporte para a contextualização do tema e melhor compreensão sobre os aspectos literários. A pesquisa bibliométrica amparou as buscas na literatura sobre aplicações da InSAR no contexto geotécnico, permitindo uma análise mais ampla do arcabouço científico nacional e internacional sobre o tema. A bibliometria se subdivide em três etapas fundamentais: busca na base de dados, tratamento dos dados e análise quantitativa e qualitativa dos dados bibliométricos.

4.2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

As revisões de literatura são essenciais para apoiar e justificar a pesquisa primária, sintetizando o conhecimento sobre um determinado tema e identificando lacunas existentes. De acordo com Snyder, (2019), a pesquisa bibliográfica consiste uma importante etapa no processo de geração de conhecimento científico, permite identificar e organizar conceitos chave em uma determinada área, possibilitando a criação de modelos analíticos e hipóteses de pesquisa.

A revisão bibliográfica se concentrou no entendimento da tecnologia InSAR, suas atribuições, e sua aplicação no monitoramento geotécnico, com base em trabalhos internacionais e nacionais, tais como teses de doutorado, dissertações e livros, presentes na literatura. Esta etapa foi de grande relevância para o desenvolvimento da pesquisa, dada a necessidade de conhecer as características da técnica InSAR, estudos já realizados, suas possíveis aplicações, assim como vantagens e desvantagens, uma vez que se trata de uma tecnologia inovadora e pouco incipiente no país.

4.3 PESQUISA BIBLIOMÉTRICA

Para a melhor compreensão do estado da técnica InSAR e suas possíveis aplicações no monitoramento geotécnico foi desenvolvida uma pesquisa bibliométrica, que segundo Araújo, (2006) consiste em uma técnica quantitativa e estatística com o objetivo de medir os índices de produção e disseminação do conhecimento científico.

De acordo com Liu *et al.*, (2019b) o cenário da produção científica de uma determinada temática pode ser verificado, através da pesquisa bibliométrica, mediante análises quantitativas e qualitativas das informações extraídas das pesquisas, além de aproximar o pesquisador do objeto de estudo, pode detectar oportunidades de inovação, identificar antigas lacunas e auxiliar em novas pesquisas.

A revisão bibliométrica trata-se de uma metodologia de pesquisa para analisar quantitativamente publicações usando seus atributos ou metadados, como título, autores e suas afiliações, palavras-chave, local de publicação e referências (ABBASI; WIGAND; HOSSAIN, 2014).

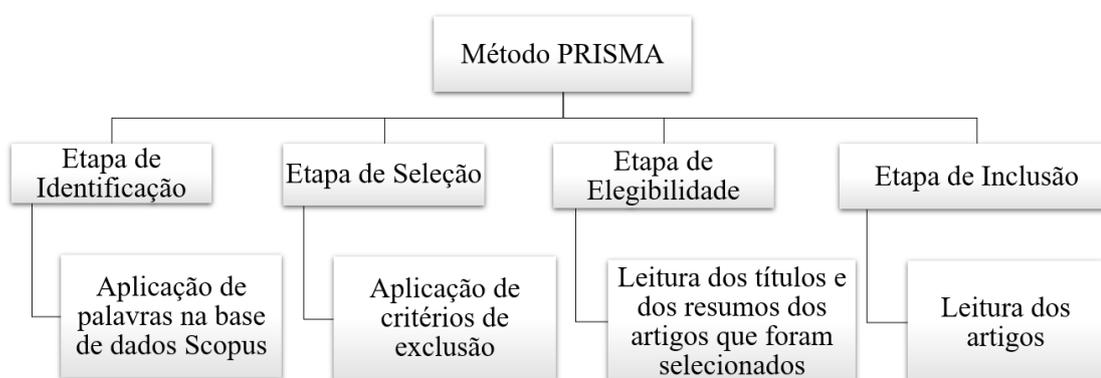
Neste estudo foi aplicado um método de sistematização de um conjunto de fases e de etapas, buscando investigar o panorama, as aplicações e os resultados

obtidos, seguindo Pluye; Hong, (2014). Assim, a investigação foi dividida em três fases, que delimitaram o método sistemático da pesquisa: (1) Busca na base de dados, (2) Tratamento dos dados, (3) Análise quantitativa e qualitativa dos dados bibliométricos.

4.3.1 BUSCA NA BASE DE DADOS

A delimitação dessa pesquisa foi realizada por meio da sistematização de um conjunto de fases e de etapas, com o objetivo de investigar o uso da tecnologia INSAR para monitoramento geotécnico. Nesta etapa, para sintetizar melhor os mecanismos de busca, foi empregada a metodologia dos Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises (PRISMA), que de acordo com Moher *et al.*, (2010) pode ser dividido em quatro etapas: (1) Etapa de Identificação, (3) Etapa de Seleção, (3) Etapa de elegibilidade e (4) Etapa de Inclusão (Figura 29).

Figura 29 - Fluxograma sistemático da metodologia empregada na etapa de busca na base de dados



Fonte: Autor (2022).

4.3.1.1 Etapa de Identificação

A etapa de identificação consiste na busca inicial de possíveis trabalhos na temática do monitoramento geotécnico a partir da tecnologia INSAR. Nessa etapa foi realizada a aplicação simultânea de palavras-chave na base de dados Scopus, que de acordo com Mongeon; Paul-Hus, (2016), apresenta maior cobertura de indexação de periódicos em diversas áreas do conhecimento, incluindo importantes periódicos relacionados a temática de geociências.

Para identificação dos artigos na base de dados Scopus, foram definidos eixos de pesquisa relevantes dentro do monitoramento geotécnico. Dessa forma, elegeu-se três temas de grande importância para a geotecnia que são, o monitoramento de taludes, estudo sobre subsidência de solo e obras de barragens.

Nas pesquisas foram aplicados um conjunto de palavras-chave, em inglês, que se encontram inseridas nos títulos, nos resumos ou nas palavras-chave dos artigos. Vale destacar a inclusão do operador *booleano* “and” entre as palavras, com objetivo de definir a combinação de termos e expressões, de modo a restringir a pesquisa a publicações que abordassem o tema desejado de modo direto e voltado a aplicações da técnica InSAR para os temas buscados.

O Quadro 12 apresenta as palavras-chave aplicadas na base de dados Scopus para cada área de aplicação (taludes, subsidência e barragem). Com o objetivo de identificar artigos que empregam a tecnologia InSAR no monitoramento geotécnico, inicialmente foi realizada a busca para a área de taludes. Em seguida, buscou-se identificar os trabalhos para o monitoramento de eventos de subsidência e por fim, a aplicação da técnica para o monitoramento de barragem.

Quadro 12 – Resumo das palavras-chave utilizadas na base de dados Scopus na etapa de identificação

Área de aplicação	Palavras-chave – Inglês	Palavras-chave – português
Taludes	“InSAR” and “Monitoring” and “Landslide” and “Slope”.	“InSAR” e “Monitoramento” e “Deslizamento” e “Talude”
Subsidência	InSAR” and “Monitoring” and “Subsidence” and “Ground deformation	InSAR” e “Monitoramento” e “Subsidência” e “Deformação do solo”
Barragem	InSAR” and “Monitoring” and “Dam” and “Ground deformation	InSAR” e “Monitoramento” e “Barragem” e “Deformação do solo”

Fonte: Autor (2022).

Após a aplicação das palavras apresentadas no Quadro 6, foi possível obter o número de artigos reportados na etapa de identificação para cada área de aplicação, conforme descreve a Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidades de artigos reportados na etapa de identificação

Área de pesquisa	Quantidade de artigos
Taludes	314
Subsistência	158
Barragem	249
Total de artigos reportados	721

Fonte: Autor (2022).

4.3.1.2 Etapa de Seleção

A etapa de seleção consiste no refinamento inicial dos resultados obtidos na etapa de identificação, para isso, são aplicados critérios de exclusão na amostra. Com o intuito de verificar o alinhamento dos artigos com o tema objeto de pesquisa, foram empregadas algumas restrições para as três áreas analisadas, aplicando-se os seguintes filtros:

- Tipo de escrito: jornal;
- Estágio de publicação: final;
- Documento: artigo;
- Idioma: Inglês;
- Período: 2018 a 2022.

O processo de seleção dos artigos foi conduzido de maneira criteriosa e transparente, visando uma boa qualidade e confiabilidade da amostra. Com a aplicação dos filtros foi possível selecionar os artigos que atendem aos critérios de exclusão e com isso tornar a amostra mais fiel ao objetivo da pesquisa. As quantidades de artigos escolhidos na etapa de seleção encontram-se descritos na Tabela 2, que faz um comparativo entre o número de artigos reportados na etapa de identificação e os artigos selecionados após a aplicação dos filtros.

Tabela 2 - Quantidades de artigos selecionados após critérios de exclusão

Área de pesquisa	Quantidade de artigos	
	Etapa de Identificação	Etapa de Seleção
Taludes	314	127
Subsidência	158	90
Barragem	249	43
Total de artigos	721	260

Fonte: Autor (2022).

4.3.1.3 Etapa de Elegibilidade

A etapa de elegibilidade consiste na definição dos artigos que foram escolhidos após a leitura dos resumos. Foi realizada a leitura dos resumos dos 260 artigos selecionados, durante a leitura observou-se algumas inconformidades, que levaram a exclusão dos artigos relacionados.

Além disso, foram excluídos alguns artigos por tratarem puramente de modelos matemáticos de análise de imagens SAR, sem destacar diretamente os temas de análise de aplicações. Com isso foram selecionados apenas os artigos incluídos na pesquisa, considerando a pertinência e adequação ao tema e objetivo da pesquisa, que é apresentar e discutir as capacidades da técnica InSAR no monitoramento geotécnico.

A Tabela 3 apresenta um comparativo entre a quantidade de artigos reportados na etapa de identificação, os artigos escolhidos na etapa de seleção e os artigos eleitos após a leitura dos resumos.

Tabela 3 – Quantidade de artigos elegidos para a etapa de inclusão

Área de pesquisa	Quantidade de artigos		
	Etapa de Identificação	Etapa de Seleção	Etapa de Elegibilidade
Taludes	314	127	63
Subsidência	158	90	49
Barragem	249	43	26
Total de artigos	721	260	138

Fonte: Autor (2022).

4.3.1.4 Etapa de Inclusão

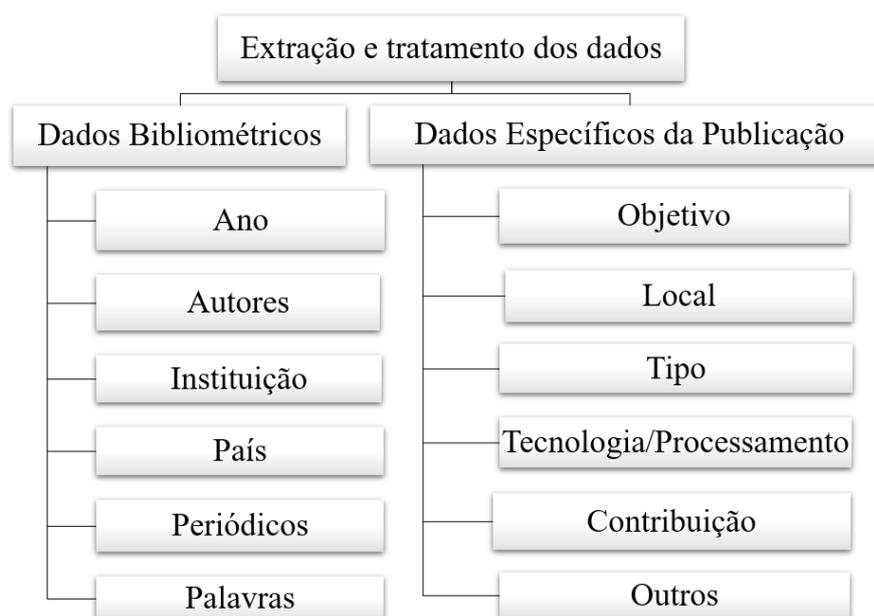
Na etapa de inclusão os artigos que foram eleitos na etapa anterior passaram por uma última análise. Os 138 artigos elegidos foram lidos, com o objetivo de identificar possíveis inconformidades com a pesquisa e com isso realizar a exclusão dos artigos que não faziam parte do objetivo em estudo, culminando em uma maior precisão da amostra.

Com a leitura dos artigos, constatou-se que todos os trabalhos eleitos estão em conformidade com o objetivo da pesquisa, e portanto, incluíram-se os 138 artigos científicos para análise da produção científica, os dados bibliométricos dos artigos foram exportados e tratados.

4.3.2 TRATAMENTO DOS DADOS

A etapa de tratamento dos dados bibliométricos dos artigos científicos se dividiu em duas linhas de entendimento, uma correlacionada aos dados bibliométricos da publicação. Uma outra linha de entendimento, relacionou-se aos dados específicos da publicação. A Figura 30 apresenta um fluxograma com as principais informações extraídas na etapa de tratamento dos dados para as duas tipologias.

Figura 30 – Representação das informações extraídas para a etapa de tratamento dos dados



Fonte: Autor (2022).

Como pode ser observado na Figura 30, os dados bibliométricos da publicação para fase da Análise Bibliométrica, compreenderam os seguintes itens: ano de publicação do estudo; autores; instituição dos autores; país de origem dos autores; tipo do artigo; periódico de publicação; e palavras empregadas no título, no resumo e nas palavras-chave.

E os dados específicos da publicação estão relacionados às informações, atreladas ao estudo realizado na pesquisa dos artigos: objetivo da pesquisa; local de investigação; tipo de aplicação; tecnologias e processamentos aplicados para auxiliar a utilização da técnica InSAR no monitoramento geotécnico e suas principais contribuições.

Os dados de indexação dos artigos, cadastrados na plataforma da Scopus, foram exportados nos formatos (.bib e .xls) e com o auxílio de programas R Studio (pacote Bibliometrix) e Microsoft Office Excel realizou-se a triagem das informações, levantando dados relacionados a análise quantitativa e qualitativa da amostra, por meio de estatística descritiva, para processamento dos dados gerais e específicos da publicação.

4.3.3 ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA DOS DADOS BIBLIOMÉTRICOS

Para a análise quantitativa e qualitativa com o auxílio dos softwares R Studio (pacote Bibliometrix) e Microsoft Office Excel foi possível realizar a análise quantitativa, a partir de estatística descritiva para confecção de tabelas, gráficos e figuras, responsáveis por agrupar, organizar e ilustrar as informações exportadas.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados das análises quantitativa e qualitativa para cada um dos temas geotécnicos da pesquisa, quais sejam: Taludes, Subsidência e Barragens. Foram explorados os quantitativos de publicações por ano, estabelecendo uma ferramenta gráfica que pudesse mostrar a evolução das publicações ao longo dos últimos 5 anos, o volume acumulado de publicações para esse tempo e a média de artigos alcançada.

Também foram levantadas informações sobre as instituições de origem dos autores e suas respectivas nacionalidades, visando discutir a influência geográfica das publicações, bem como a relação entre os institutos e o volume de publicações para

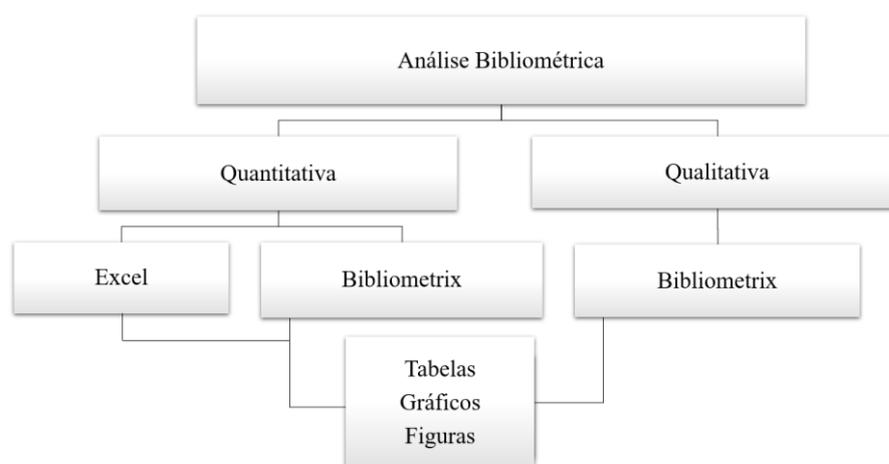
o tema discutido. Dentre as análises foram construídas tabelas com o número total de citações dos artigos, destacando aqueles mais citados. Além disso, foram levantados os artigos com maiores números de citações por período de publicação, que representa a razão entre o total de citações do artigo e o tempo decorrido desde sua publicação.

Para a formulação da nuvem de palavras, foram considerados um grupo de palavras, oriundas dos títulos e resumos dos artigos analisados, determinando a frequência com que apareciam. De acordo com Mouro, Santos e Castro, (2018), a nuvem de palavras permite verificar a coerência na escolha das palavras-chave aplicadas na etapa de identificação, além de possibilitar novas investigações.

Dentre os aspectos explorados, também foram levantadas informações relativas aos períodos com maiores volumes de publicações nos temas de busca. Essas informações serviram para relacionar a relevância dos periódicos e seu desempenho quanto a avaliações de fator de impacto internacional de publicações, bem como avaliações por entidades como o Qualis da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), em sua avaliação quadrienal 2017-2020.

Buscou-se examinar a coerência das informações apresentadas nos elementos gráficos gerados, com relação a quantidades de periódicos, autores, e palavras frequentes. A Figura 31 apresenta o fluxograma da análise quantitativa e qualitativa dos dados bibliométricos.

Figura 31 – Fluxograma da análise quantitativa e qualitativa dos dados bibliométricos



Fonte: Autor (2022).

5 APLICAÇÕES DA INSAR NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

Neste capítulo serão apresentadas e discutidas algumas aplicações da InSAR no campo da Engenharia Civil e alguns casos de aplicações diretas na geotecnia. Inicialmente são mostradas aplicações InSAR em diferentes campos e na sequência discutidos estudos de casos da literatura sobre os temas de subsidência, taludes e barragens. Nas análises, são apresentados resultados bibliométricos das buscas realizadas na literatura sobre os temas geotécnicos e informações técnico-científicas sobre as características da InSAR.

5.1 APLICAÇÕES DA InSAR

O rápido desenvolvimento de tecnologias espaciais tem contribuído para o surgimento de novas técnicas de detecção de deslocamentos na superfície terrestre, bem como, monitorização de estruturas, além de fornecer informações com alta precisão (PATRÍCIO, 2018). Segundo Souza (2022) a disseminação da InSAR em âmbito global, mostra como essa tecnologia pode ser empregada em grandes áreas, em destaque para sua capacidade de monitoramento de grandes áreas com elevada cobertura de pontos de medição.

Ao longo dos anos diversas tecnologias foram sendo desenvolvidas, melhorando as capacidades dos equipamentos, sensores e estrutura de processamento de dados, permitindo cada vez mais, melhores resultados da InSAR. Atualmente é possível encontrar diversos trabalhos científicos como livros, teses e artigos com trabalhos utilizando dados interferométricos SAR nos mais variados campos de aplicações.

Diversas são as aplicações da InSAR podendo citar a Engenharia Civil (Hidrologia, Geotecnia, Estruturas, Hidráulica, Construção Civil, Infraestrutura de Transportes); Geociências (Geologia, Geodésia, Geofísica, Sensoriamento Remoto, Fotogrametria, Hidrogeologia); Engenharia Sanitária (Recursos Hídricos, Águas Subterrâneas e Poços, Controle de Enchentes e de Barragens); Oceanografia; Engenharia de Minas (SOUZA, 2022).

Segundo Negrão *et al.* (2017) a técnica interferométrica SAR pode ser empregada para monitoramento de movimentações superficiais. Na geotecnia, os dados interferométricos são úteis na detecção de movimentações de subsidência

devido a exploração de águas subterrâneas, movimentos de massa, monitoramento de taludes (taludes de mineração, taludes rodoviários), subsidências de solos moles, barragens de terra e obras civis como pontes, túneis, ferrovias e rodovias.

A Tabela 4 proposta por Crossetto *et al.* (2016) traz uma síntese das principais aplicações da InSAR em diversos campos do conhecimento e elenca uma série de trabalhos que podem ser acessados e pelos quais é possível conhecer em detalhe as possibilidades do emprego de dados interferométricos SAR.

Tabela 4 – Aplicação da tecnologia InSAR.

Áreas principais	Subárea	Referências
Engenharia	Área Urbana	Lanari <i>et al.</i> (2004b); Vallone <i>et al.</i> (2008); Herrera <i>et al.</i> (2009a); Gernhardt <i>et al.</i> (2010)
	Infraestrutura	Ferretti <i>et al.</i> (2000a); Lan <i>et al.</i> (2012); Sousa e Bastos (2013); Crossetto <i>et al.</i> (2015)
	Edifícios	Gernhardt e Bamler (2012); Karila <i>et al.</i> (2013); Gernhardt, Auer e Eder (2015)
	Barragem	Wang <i>et al.</i> (2011); Tomás <i>et al.</i> (2013); Di Martire <i>et al.</i> (2014); Sousa (2016)
	Construções	Strozzi, Teatini e Tosi (2009); Zhao <i>et al.</i> (2009); Liu, Sowter e Niemeier (2014)
Soerguimento de terreno/Subsidência de solos	Mineração	Colesanti <i>et al.</i> (2005); Herrera <i>et al.</i> (2007); Ketelaar (2009); Wegmüller <i>et al.</i> (2010)
	Exploração de águas subterrâneas	Galloway <i>et al.</i> (1998); Amelung <i>et al.</i> (1999); Ferretti, Prati e Rocca (2001); Hoffmann (2003)
	Eventos de inundação	Dixon <i>et al.</i> (2006); Boni <i>et al.</i> (2007); Teatini <i>et al.</i> (2012); Abidin <i>et al.</i> (2015b); Dumitru <i>et al.</i> (2015)
Deslizamento	Inventário	Cascini, Fornaro e Peduto (2010); Notti <i>et al.</i> (2010); Righini, Pancioli e Casagli (2012)
	Monitoramento	Farina <i>et al.</i> (2006); Herrera <i>et al.</i> (2009b); Tofani <i>et al.</i> (2013); Mura <i>et al.</i> (2014)
	Análise e modelagem	Herrera <i>et al.</i> (2011); Bovenga <i>et al.</i> (2012); Rosi <i>et al.</i> (2013); Cigna, Bianchini e Casagli (2013)
Geofísica	Tectonismo	Bürgmann <i>et al.</i> (2006); Lanari <i>et al.</i> (2007); Motagh <i>et al.</i> (2007); Reale <i>et al.</i> (2011)
	Vulcanismo	Massonnet, Briole e Arnaud (1995); Lu <i>et al.</i> (1997); Hooper <i>et al.</i> (2004); Bignami <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Adaptado de Crossetto *et al.*, (2016).

5.2 MONITORAMENTO DE SUBSIDÊNCIA

A subsidência de terra segundo Raspini *et al.* (2022) é definida como um movimento vertical da superfície terrestre, entendendo-se como um rebaixamento lento e gradual ou afundamento repentino do solo. Os fatores de causa da subsidência podem estar relacionados a processos desencadeados a partir de causas naturais ou antropogênicas, de caráter único ou a partir da combinação de múltiplos fatores.

Os fatores naturais geralmente estão associados aos aspectos endógenos, como a geologia, movimentos tectônicos, vulcanismo e aspectos exógenos, dentre eles os processos naturais de compactação de sedimentos, especialmente aqueles de granulação fina normalmente consolidados, como argila mole, turfa e solos orgânicos, que são fortemente acelerados no caso de carga de construção (SOLARI *et al.*, 2016).

A subsidência induzida ou acelerada pelos fatores humanos resulta de causas variadas, como retirada de fluidos em profundidade (água, petróleo ou gás), mineração, escavação de túneis, dissolução de rochas carbonáticas e processos de oxidação de matéria orgânica (GALLOWAY; BURBEY, 2011). Os impactos causados pela subsidência podem ter consequências diretas e indiretas, sob diversos aspectos conforme destaca Hasanuddin *et al.*, (2015) e Abidin *et al.*, (2015) por meio da Tabela 5.

Segundo Solari *et al.*, (2018) quando os fenômenos de subsidência ocorrem em áreas urbanas, oferecem grande ameaça, tendo em vista, que a ação contínua do rebaixamento do terreno ao longo do tempo, pode danificar seriamente infraestruturas (pontes, estradas, ferrovias), além de sérios problemas para estabilidade dos edifícios quando da ocorrência de deslocamentos diferenciais.

Devido a sua ampla distribuição pelo mundo, e consequências danosas para o meio ambiente e economia, a subsidência tem sido um dos maiores desafios nos estudos de geociências e precisa de pesquisa, transferência de tecnologia e mais investigação e monitoramento em nível internacional. Historicamente, a subsidência de terrenos tem sido monitorada por meio de diferentes metodologias *in situ*, como nivelamento geométrico de alta precisão, extensômetros, redes GNSS, que permitem a recuperação de medidas precisas (RASPINI *et al.*, 2022b).

Tabela 5 - Características dos impactos da subsidência do solo.

Categoria	Representação do impacto	Nível do impacto
Infraestrutura	Danificação de construções e estradas Inclinação de casas e edifícios Ruptura de tubulações subterrâneas e utilidades	Direto
	Rebaixamento de casas e edifícios Mau funcionamento do sistema de esgotos e drenagem Deterioração de edifícios e infraestruturas	Indireto
Ambiental	Mudanças nos sistemas de fluxo de drenagem e canal e rio Inundações costeiras frequentes Expansão ampla de áreas de inundação Áreas inundadas e infraestruturas Aumento da intrusão da água do mar Deterioração na qualidade da condição ambiental Impossibilidade de recarga, extinção de aquíferos	Indireto
Econômico	Aumento no custo de manutenção de infraestrutura Diminuição de valores da Terra e da propriedade Abandono de edifícios e instalações Perturbação de atividades econômicas	
Social	Comprometimento de abastecimento de água Deterioração da qualidade ambiental e de vida Suspensão de atividades diárias das pessoas	

Fonte: Abidin *et al.* (2015).

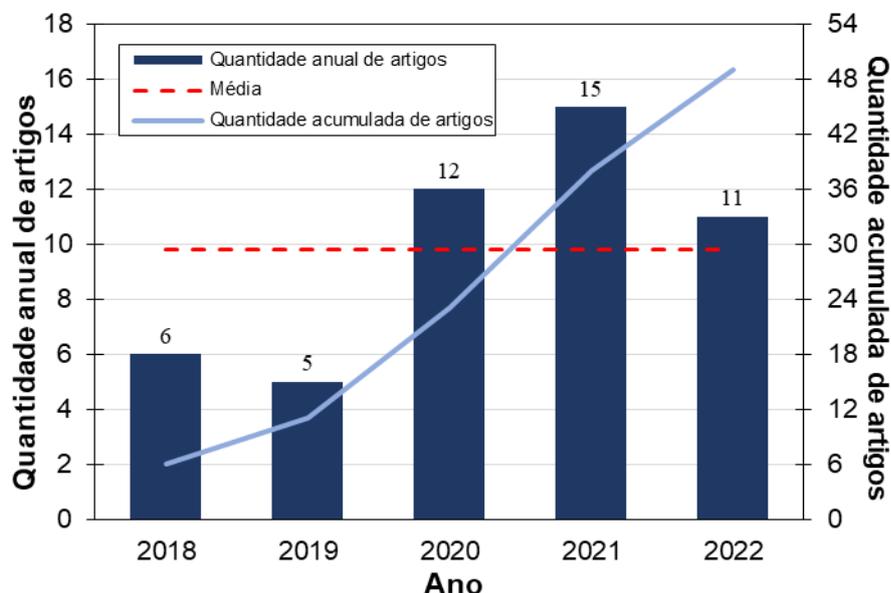
A aquisição de imagens por meio de Radar de Abertura Sintética (SAR) e análise com Interferometria Diferencial Avançada (A-DInSAR) é uma ferramenta útil para monitorar diferentes movimentos do solo, incluindo subsidência. O desenvolvimento de novos algoritmos de análise e processamento desenvolvidos nas últimas décadas permitem atingir precisão milimétrica, além de uma cobertura de dados em escala regional. Essas vantagens têm sido exploradas para monitorar a subsidência do solo de áreas urbanas em diversas partes do mundo (CROSETTO *et al.*, 2016).

5.2.1 Resultados Bibliométricos

Nas análises propostas nesta pesquisa, foram levantados resultados bibliográficos (2018 – 2022) das buscas sobre o tema de monitoramento de subsidência usando a InSAR, realizadas na base de dados da Scopus. A análise de publicações nos últimos cinco anos, dentro dos critérios de busca desta pesquisa, mostra um total de 49 artigos (Figura 32) e é possível perceber um aumento das publicações ao longo do tempo, com o ano de 2021 registrando o maior número de publicações. Embora os anos de 2018 e 2019 não tenham apresentado números

expressivos a média de publicações anuais ficou próxima de 10, valor que foi superado nos anos de 2020 a 2022.

Figura 32 - Evolução do número de publicações na base de dados Scopus (2018 a 2022) sobre aplicação de InSAR em subsidência



Fonte: Autor (2022).

Em uma análise sobre as instituições e universidades ao redor do mundo com artigos publicados na temática, observa-se por meio da Tabela 6 um forte predomínio chinês com 38 artigos publicados, representando um percentual de 77,5% dos artigos considerados. Destaca-se também publicações oriundas de países como Alemanha, com 3 artigos do renomado Instituto *German Research Centre for Geosciences – GFZ*, além da Espanha e Reino Unido igualmente com 3 publicações cada.

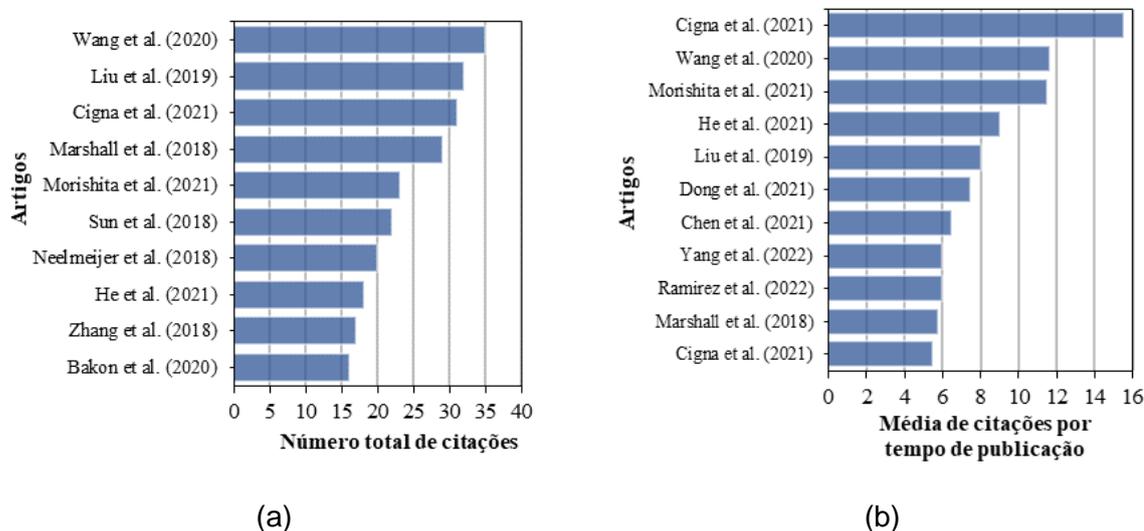
Tabela 6 - Principais instituições com publicações sobre aplicação de InSAR em subsidência

Instituições	País	Quantidade de artigos
Capital Normal University	China	8
Chang'an University	China	7
China University of Mining and Technology	China	6
Southwest Jiaotong University	China	5
Central South University	China	3
East China Normal University	China	3
GFZ – German Research Centre for Geosciences	Alemanha	3
University of Nottingham	Reino Unido	3
Universidad de Jaén	Espanha	3
University of Chinese Academy of Sciences	China	3
Wuhan University	China	3

Fonte: Autor (2022).

O total de citações dos 49 artigos na base de dados da Scopus foi igual a 478, sendo aproximadamente 46% referentes a apenas 10 artigos, destacados na Figura 33a, apontando para uma relevância técnico-científica desses autores sobre o tema e assuntos afins. Em uma análise mais detalhada, destaca-se o volume de citações no tempo do estudo (Figura 33b), nesse aspecto é possível destacar que dentre os 11 artigos com maiores médias de citações, os cinco primeiros também aparecem listados naqueles com maiores números de citações (Figura 33a) indicando relevância para o tema e suas contribuições científicas.

Figura 33 - Análise das citações dos artigos sobre aplicação de InSAR em subsidência: (a) 10 maiores quantidade de citações, 10 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 11 artigos



Fonte: Autor (2022).

A nuvem de palavras é uma ferramenta visual muito interessante em análises bibliométricas, tendo em vista a capacidade síntese de apresentar os termos mais importantes presentes nos títulos, resumos e palavras-chave a partir das buscas. Na Figura 34 é possível identificar em destaque as palavras síntese “subsidence”, “deformation”, “InSAR” e “ground” que aparecem nas quatro tipificações definidas para a análise. Esses resultados corroboram com as palavras-chave definidas pelo autor na etapa de busca, indicando sintonia dos termos com a pertinência e relevância das informações alcançadas a partir da busca.

Tabela 7 - Principais periódicos com as métricas de impacto

Periódicos	Distribuição dos artigos		Métricas de impacto		Classificação Qualis/CAPES Engenharias I	
	Quantidade	Contribuição	CiteScore 2021	Journal Citation Reports (JCR) 2021	Quadriênio 2013-2016	Quadriênio 2017-2020
1 Remote Sensing	22	44,90%	7.4	5.349	B1	A1
2 International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation	4	8,16%	10.5	-	-	A1
3 Advances in Space Research	2	4,08%	4.7	2.611	-	A2
Total	28	57,14%	-	-	-	-

Fonte: Autor (2022).

5.2.2 Casos da Literatura

Nas discussões em sequência são destacados alguns estudos de caso, em que a Interferometria (InSAR) foi aplicada na análise da subsidência, podendo contribuir na identificação, controle e monitoramento dos deslocamentos de superfície, bem como prestou auxílio na gestão de riscos de perigos.

5.2.2.1 Estudo de subsidência de solo em função da construção de túnel

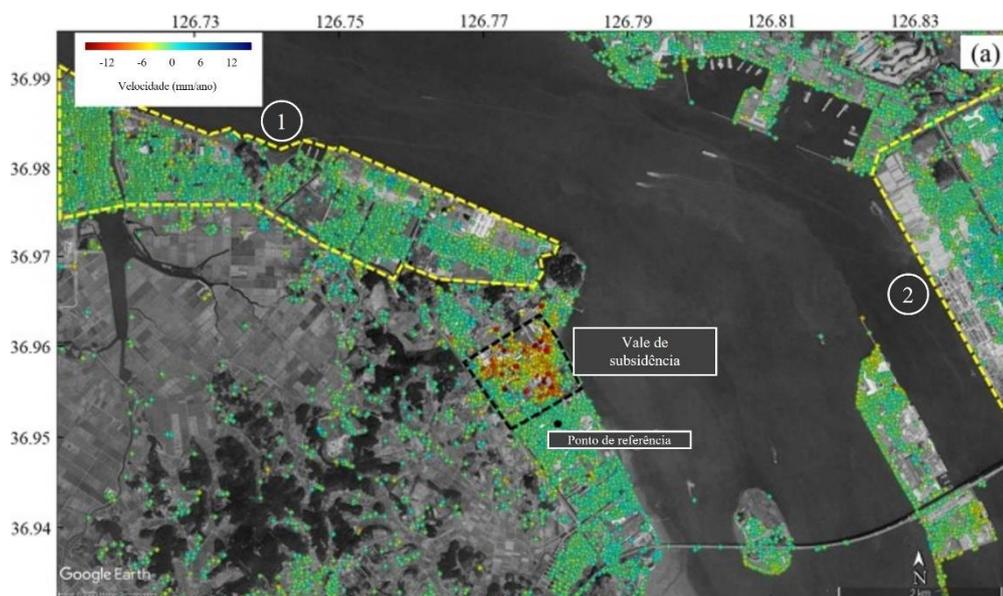
Como discutido anteriormente, as interferências humanas podem desencadear subsidência induzida, gerando efeitos nocivos a infraestruturas urbanas e obras de engenharia. Os autores Ramirez *et al.*, (2022) realizaram um estudo em que exploraram a InSAR para monitorar deslocamentos de superfície do solo associada a diferentes fases da construção de um túnel (diâmetro de 4,5 m e comprimento de aproximadamente 722 m) para passagem de cabos de transmissão de energia na cidade de Dangjin, na República da Coreia.

Os autores apresentaram uma distribuição espacial da subsidência do solo, mostrando as velocidades médias de deslocamento LOS (ascendente) adquiridas por meio do satélite Sentinel-1B entre setembro de 2016 a julho de 2019, usando método de análise PS-InSAR. A Figura 35 mostra a distribuição espacial dos pontos PS, onde constata-se uma maior concentração nas áreas delimitadas pelos polígonos 1 e 2

(tracejados em amarelo), região onde se observa edifícios e áreas com grandes construções industriais. Nessas regiões, verifica-se uma densa nuvem de pontos e em contraste, na porção mais a sudoeste uma redução no número de pontos, região com terras agrícolas e vegetação.

As imagens SAR foram capazes de perceber as movimentações superficiais decorrentes da abertura do túnel e estabelecer a distribuição espacial da subsidência. Segundo Ramirez *et al.*, (2022) os resultados das análises PS-InSAR mostraram valores de taxa média de subsidência próximos de 5 mm/ano, com uma taxa máxima > 40 mm/ano e deslocamento máximo acumulado de ~200 mm. Os autores também propuseram uma validação das informações obtidas pela InSAR, fazendo um levantamento de nível de superfície de campo ao longo de dois segmentos rodoviários na área de estudo, trechos de seções A–A' e B–B'.

Figura 35 - O mapa de velocidade de deslocamento da linha de visada (LOS) da área de estudo. A área de estudo está marcada pelo polígono preto tracejado. Velocidades mínimas de deformação do solo são observadas nos polígonos amarelos tracejado 1 e 2



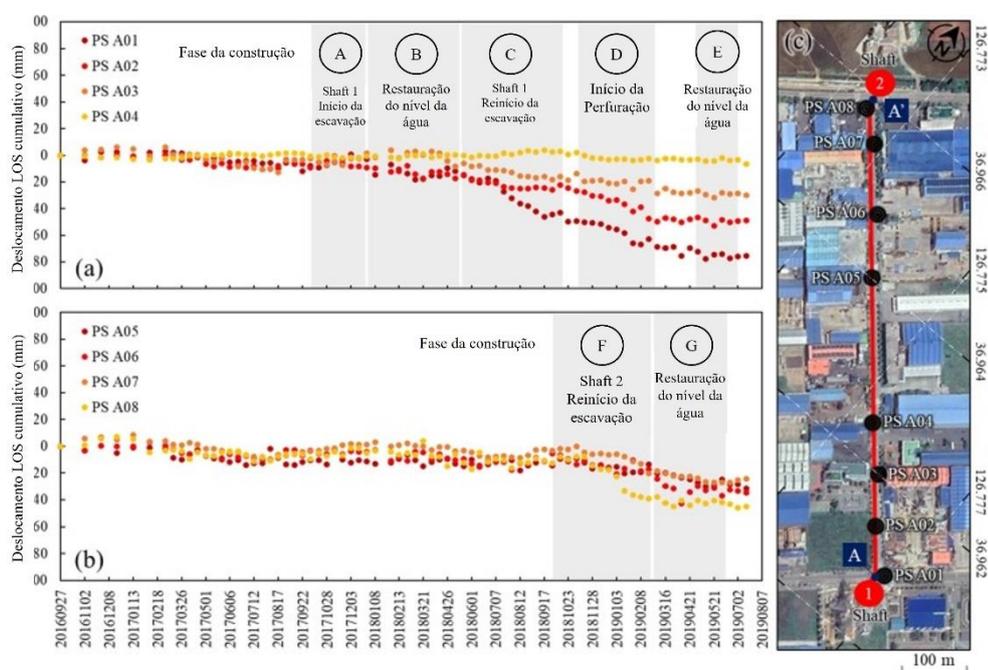
Fonte: Adaptado de Ramirez *et al.*, 2022.

O trecho A-A' representa o seguimento rodoviário acima da linha de execução do túnel. Para esse trecho os resultados da série temporal gerada para os pontos (Figura 36a) mostram uma subsidência mais pronunciada que excede -50 mm próximo ao poço vertical 1, quando os níveis do lençol freático foram restaurados durante a Fase B, as taxas de deslocamento diminuíram. Na Fase C, a subsidência recomeçou com o reinício da escavação do Poço Vertical 1 (círculo vermelho). Este movimento descendente continuou durante o tunelamento (Fase D). No entanto, a taxa de

subsidiência diminuiu novamente quando o túnel de blindagem foi temporariamente interrompido e o nível do lençol freático foi restaurado (Fase E).

O assentamento da superfície nas proximidades do Poço Vertical 2 foi gradualmente estabilizado com a restauração do nível do lençol freático durante a Fase G (Figura 36b). A interação entre a restauração do nível do lençol freático e o comportamento do assentamento é notável. Segundo os autores, os resultados indicam que a subsidiência do solo está relacionada aos níveis de água subterrânea, que são afetados pelas atividades de construção.

Figura 36 - Séries temporais de deslocamento LOS cumulativo para os pontos PS selecionados ao longo da Seção A–A': (a) PS A01-para-PS A04 e (b) PS A05-para-PS A08. As localizações dos pontos PS, poços verticais e rota do túnel são mostradas em (c)

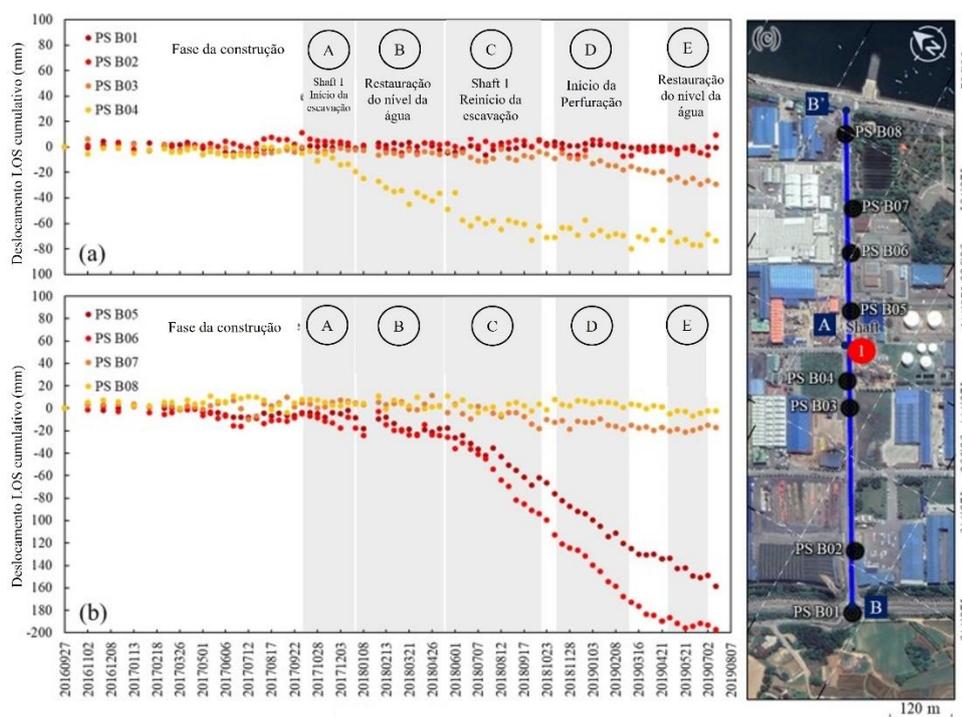


Fonte: Adaptado de Ramirez *et al.*, 2022.

A seção B-B' escolhida pelos autores está posicionado de forma ortogonal a seção A-A' e evidencia algumas características geológico-geotécnicas da região como a presença de um lençol freático raso, campos de sal recuperados com depósitos espessos de solo compressível (camada de argila de 24,5 m de espessura; e grandes complexos de edifícios). Para esse trecho são destacados deslocamentos LOS (Figura 37a) cumulativos máximos de ~ -80 mm próximos ao B04, localizado a oeste do Poço Vertical 1. A etapa de escavação do Poço Vertical 1 (Fase C) desencadeou um movimento descendente repentino, que continuou até o final da Fase E em julho de 2019. O deslocamento LOS cumulativo máximo de ~ 200 mm é registrado no PS

B06, localizado 190 m a leste do Poço Vertical 1; este valor é mais significativo do que nos pontos B04 e B05, mais próximos do Poço Vertical 1.

Figura 37 - Séries temporais de deslocamento LOS cumulativo para os pontos PS selecionados ao longo da Seção B–B': (a) PS B01-para-PS B04 e (b) PS B05-para-PS B08. As localizações dos pontos PS e do Eixo Vertical 1 são mostradas em (c)



Fonte: Adaptado de Ramirez *et al.*, 2022.

A análise PS-InSAR rastreou com sucesso a progressão espacial e temporal dos movimentos do solo relacionados às fases das atividades de construção do túnel. As estimativas de subsidência do solo baseadas em InSAR foram validadas usando dados de nivelamento medidos ao longo de dois segmentos de estrada que se cruzam no Poço Vertical 1. Danos consideráveis em edifícios e pavimentos rodoviários demonstram o grave impacto da subsidência do solo desencadeada pelas fases de construção de túneis.

Segundo Ramirez *et al.*, (2022), a escavação de túneis e o bombeamento de águas subterrâneas inevitavelmente causam distúrbios no solo circundante, especialmente em áreas de solo mole, provocando subsidência do solo. Além dessas atividades humanas, a estratificação geológica natural, particularmente a presença e espessura de camadas de solo compressível, é crítica na ocorrência de deformação do solo.

Em análise sobre influência do tipo de geologia e as condições sobre os solos encontrados em regiões de ocorrência de subsidência, destaca-se o estudo de Yang

et al., (2022) no qual autores realizaram investigações de subsidência em torno do Aeroporto Capital de Pequim. Os resultados em princípio, relacionavam-se a exploração de águas subterrâneas, embora as análises das investigações identificaram presença predominante de argila mole, fator que segundo os autores, se associa ao comportamento subterrâneo da argila mole com a exploração das águas subterrâneas.

O trabalho de Bedini, (2020) sobre ocorrência de subsidência de solo na cidade do Recife, também aborda aspectos relacionados a exploração de águas subterrâneas, embora o autor identificou localidades da cidade em que foram identificadas taxas de subsidência da ordem de -25 mm/ano, que podem estar relacionadas ao adensamento do solo. No estudo são mencionadas pequenas zonas onde foram construídos edifícios mais recentes e se observou os processos de adensamento do solo, relacionados às particularidades dos solos e geologia da localidade.

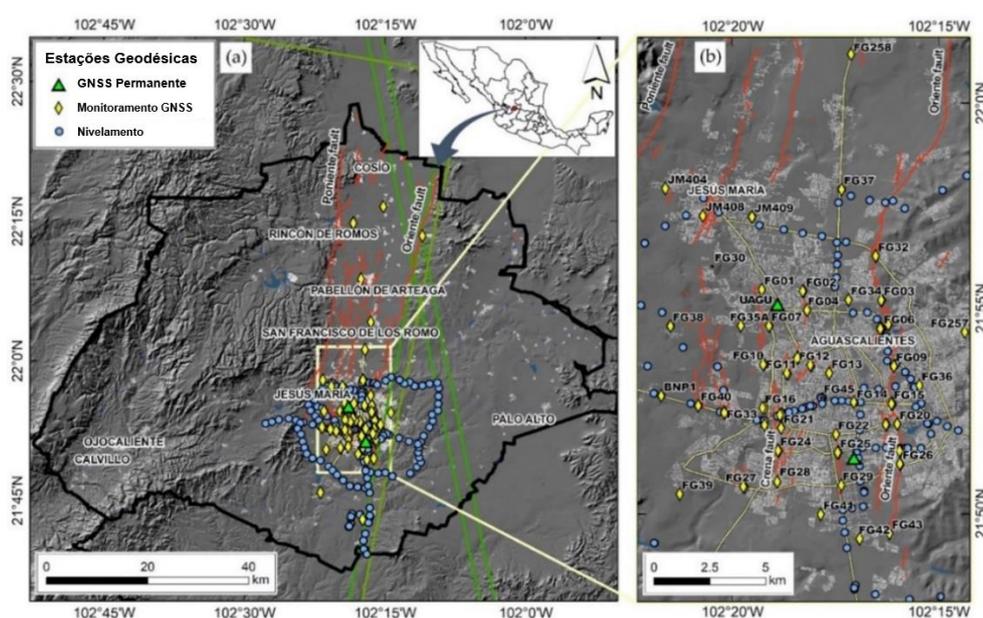
5.2.2.2 Estudo de subsidência de solos devido a exploração de aquífero

As observações LOS sejam por visadas ascendentes ou descendentes, oferecem grandes possibilidades nas análises do deslocamento, no entanto, a decomposição do LOS em informações de deslocamentos verticais e horizontais (leste-oeste), permitem melhor compreensão espacial das deformações de superfície (RADMAN; AKHOONDZADEH; HOSSEINY, 2021).

No estudo realizado por Cigna; Ramírez; Tapete, (2021) foram avaliados conjuntos de dados InSAR utilizando a decomposição da geometria LOS em dados de deslocamento vertical e Leste-Oeste. Os autores realizaram estimativas de velocidade de deslocamento derivadas da InSAR, tendo como área de estudo o Vale de Aguascalientes no centro do México (Figura 1). Na área ocorre um sistema aquífero não confinado, formado por sedimentos aluviais e fluviais, sob influência da exploração de águas subterrâneas e redução do nível piezométrico. Por meio da Figura 38a é possível ver a localização da área de estudo (retângulo branco), além de falhas que induziram danos a infraestrutura urbana da cidade de Aguascalientes e algumas vilas construídas ao longo do vale.

No estudo foram usadas imagens obtidas por meio do Satélite Sentinel-1, que possui tempo de revisita de 12 dias e opera sistema radar equipado com banda C e pilhas de imagem sob faixa IW e polarização única VV. Ao todo foram usadas 24 imagens adquiridas ao longo de visada descendente durante o período de 25 de outubro de 2014 a 20 de setembro de 2016 e 22 imagens de visada ascendentes entre 16 de outubro de 2014 e 29 de outubro de 2016.

Figura 38 - Localização das estações geodésicas no estado de Aguascalientes (a) e na cidade de Aguascalientes em detalhe (b). As linhas vermelhas nos mapas são os vestígios de falhas e as linhas verdes são indicações das subfaixas das órbitas ascendentes e descendentes



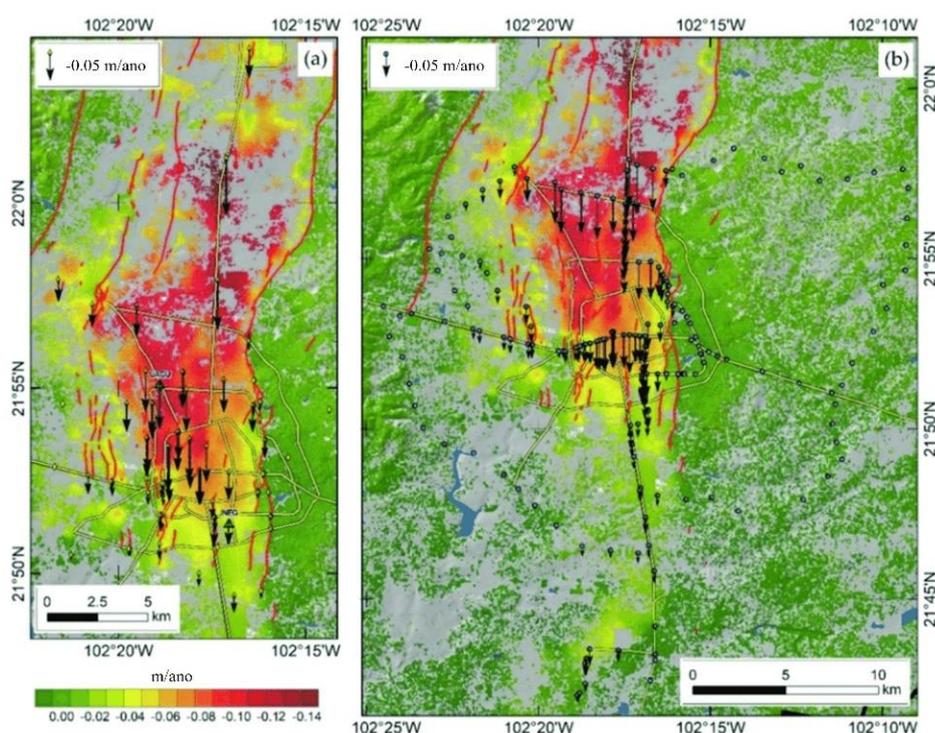
Fonte: Adaptado de Cigna *et al.*, 2021.

Segundo os autores os resultados das observações com método PSInSAR, para velocidades LOS variam entre -113 e +40 mm/ano para o conjunto de dados ascendente e entre -103 e +48 mm/ano para o descendente. Já os resultados de velocidade considerando a combinação dos dados ascendentes e descendentes indicaram taxas mínimas e máximas de -141 e +46 mm/ano para a velocidade vertical e -64 e +68 mm/ano para a velocidade leste-oeste.

Os autores Cigna; Ramírez; Tapete, (2021) também relacionaram os resultados de velocidade vertical PSInSAR com dados GNSS, apresentando a direção dos vetores indicativos da orientação do movimento e contribuindo para compreensão da direção Norte-Sul que não é possível obter pela InSAR. A Figura 39a mostra a combinação dos dados GNSS, com resultados de velocidade vertical entre -99 e +8 mm/ano, e as maiores velocidades negativas registradas na parte noroeste,

diminuindo para valores próximos de -50 mm/ano quando se move em direção ao setor sudoeste. A leste da falha do Oriente, os valores de velocidade vertical estão limitados à faixa de ± 8 mm/ano. Os dados de nivelamento, também são apresentados indicando consistência com as observações InSAR e GNSS, com taxas verticais observadas na área pesquisada entre -97 e $+8$ mm/ano (Figura 39b).

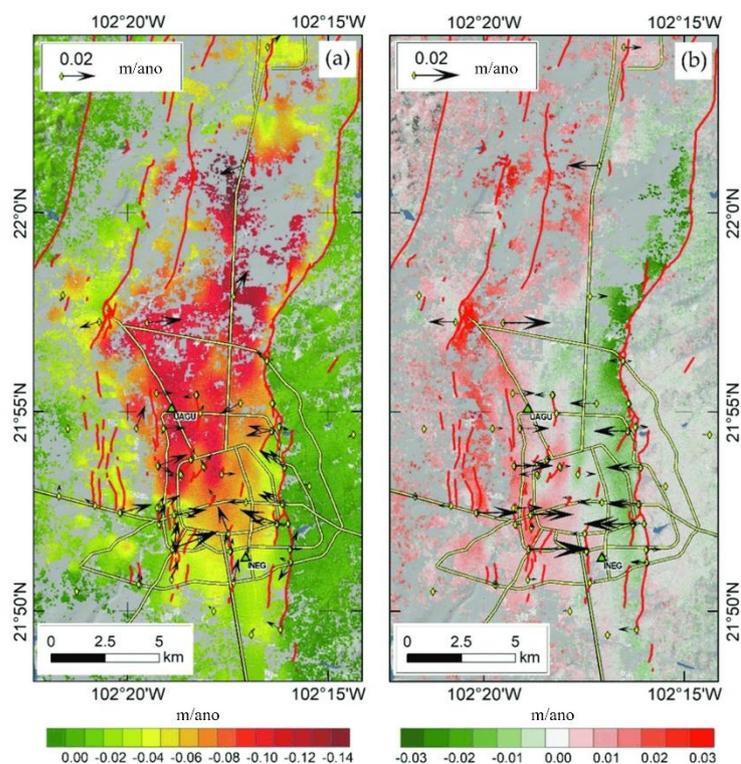
Figura 39 - Velocidades vertical de dados geodésicos: (a) nos benchmarks GNSS e estações permanentes e (b) nos benchmarks de nivelamento; ambos plotados sobre velocidades verticais derivadas de PSI



Fonte: Adaptado de Cigna *et al.*, 2021.

Da mesma forma, os autores apresentaram os valores das taxas de deslocamento horizontal e usando GNSS sobre dados de deslocamento vertical pela InSAR (Figura 40a). As taxas de deslocamento apareceram mais significativas ao longo da direção leste-oeste, com velocidades atingindo -22 e $+27$ mm/ano (Figura 40b). Os picos negativos (direção oeste) foram encontrados nas proximidades da falha do Oriente onde se registou movimento significativo para o centro do vale, geralmente com taxas entre -12 e -15 mm/ano. Os picos positivos (deslocamentos para o leste) foram registrados perto do aglomerado de falhas que limitam o setor oeste da cidade. Em sua proximidade, os movimentos foram tipicamente entre $+9$ e $+19$ mm/ano, enquanto $+27$ mm/ano foi alcançado no benchmark FG24.

Figura 40 - Velocidades horizontais de dados GNSS nos pontos de referência: (a) vetor de velocidade horizontal plotado sobre velocidades verticais derivadas de PSI e (b) apenas velocidades Leste-Oeste plotadas sobre velocidades derivadas de PSI

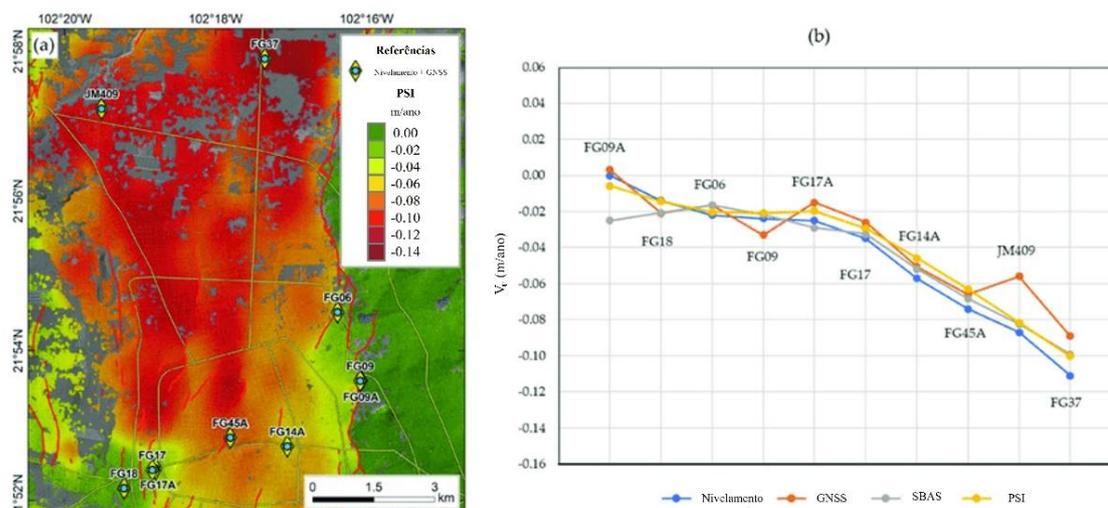


Fonte: Adaptado de Cigna *et al.*, 2021.

Na Figura 41a, é possível observar resultados de velocidade de deslocamento vertical para 10 pontos de referência do posicionamento GNSS e nivelamento geodésico e comparados com as estimativas fornecidas pela InSAR usando os métodos PSInSAR e SBAS. Como é possível observar na Figura 41b, os autores apontam para uma correspondência muito alta entre as observações, com algumas discrepâncias (por exemplo, nos benchmarks FG09A e JM409) que podem ser explicadas pela proximidade dos benchmarks às falhas principais

Os autores fazem uma síntese dos resultados destacando as precisões entre os métodos geodésicos (GNSS e nivelamento) e a interferometria SAR (técnicas SBAS e PSI). As precisões encontradas para as taxas verticais estimadas com PSI e SBAS foram da ordem de 9-10 mm/ano contra dados GNSS completos e abaixo de 8 mm/ano contra dados de nivelamento. Referindo-se apenas às taxas verticais mais precisas das duas estações GNSS permanentes, a precisão melhorou para 6 mm/ano para PSI e 7 mm/ano para SBAS.

Figura 41 - Velocidade de deslocamento vertical: (a) mapa de localização (Dados PSI) e (b) gráfico de comparação dos benchmarks



Fonte: Adaptado de Cigna *et al.*, 2021.

5.2.2.3 Estudo de subsidência de solos devido a exploração de gás natural

Segundo Liu *et al.*, (2019) um fator importante no estudo de subsidência é o entendimento da evolução espaço-temporal dos deslocamentos da superfície, visando melhorar a compreensão do mecanismo de deformação. Diversos estudos usam a InSAR na detecção de movimentações superficiais, no entanto, a curtos períodos, com poucas imagens SAR que dificulta o acompanhamento de longo prazo dos processos associados a subsidência.

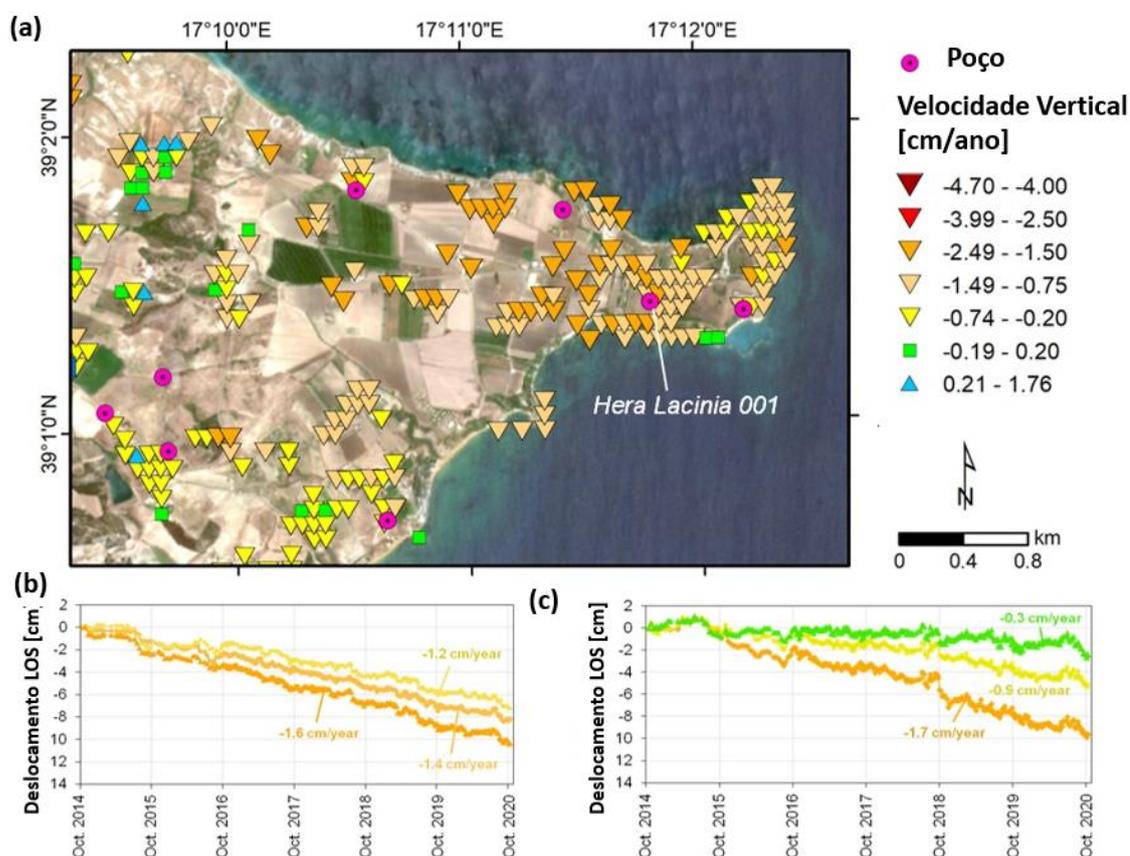
A disponibilidade de pacotes de imagens interferométricas com capacidade de observação superiores a 2 ou 3 anos, permitem melhores avaliações e compreensão da escala temporal da subsidência (CIGNA *et al.*, 2016). Como muitas vezes as missões de satélite não conseguem dispor de imagens multitemporais para além de intervalos de tempo de longos períodos, alternativamente podem ser combinadas imagens de diferentes satélites. Diversos autores como Basílio e Cols (2010), Conforto *et al.* (2012), Zechin *et al.* (2018) propuseram combinações de imagens de diferentes satélites a fim de melhorar a compreensão do fenômeno de subsidência.

No estudo realizado por Cigna; Tapete, (2021) os autores investigaram um tipo de subsidência costeira relacionada a exploração de gás natural, na região de Calábria na Itália. Nas análises realizadas foi empregado o satélite Sentinel-1 para aquisição de 579 imagens SAR durante o período de outubro de 2014 a outubro de

2020, cobrindo período de 6 anos. Foram combinadas imagens LOS segundo geometrias de aquisição ascendente e descendente, a fim de obter resultados de deslocamentos verticais e horizontais (Leste-Oeste).

A Figura 42 mostra parte dos resultados das análises dos autores em que foram apresentadas séries temporais para algumas regiões dentro da área de estudo ao longo dos 6 anos de análise. Cigna; Tapete, (2021) também destacam que após a combinação dos dois conjuntos de dados (ascendente e descendente) foi possível perceber a presença generalizada de velocidades negativas indicando subsidência, com taxas observadas de até -4,7 cm/ano. Na Figura 42 b e c., é possível ver deslocamentos LOS da ordem de 10 cm ao longo do tempo.

Figura 42 – Área de estudo e resultados de séries temporais de deslocamento vertical



Fonte: Adaptado de Cigna e Tapete, 2021.

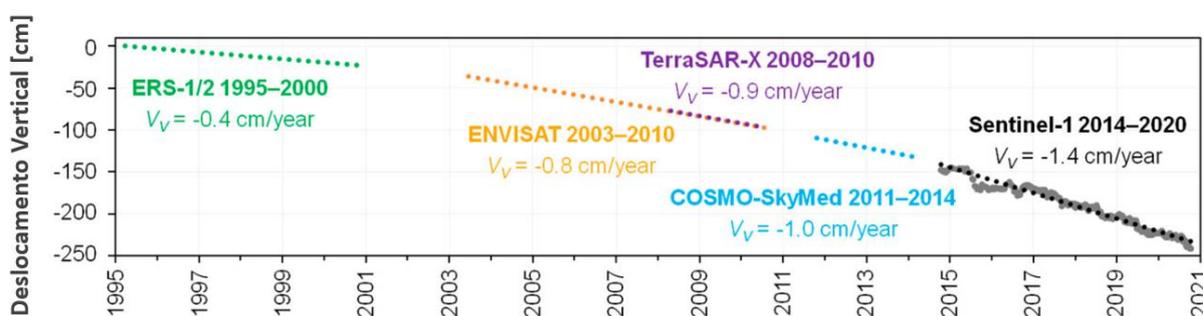
Os autores propuseram ainda a comparação dos resultados do Sentinel-1 P-SBAS com observações anteriores disponíveis na literatura a fim de verificar melhor os padrões espaciais de deslocamentos e a ordem de magnitude das taxas de deslocamento que afetam a área de estudo. Dessa forma, foram combinados resultados de imagens obtidas por meio de diferentes constelações de satélites as

quais foram ERS-1/2, ENVISAT, TerraSARX e COSMO-SkyMed, considerando o período de 1995 a 2020.

Na Figura 43 é possível ver resultados de séries temporais de deslocamento vertical, considerando diversas imagens e um longo período de análise. Os autores também apresentam valores de taxas de deslocamento anuais, relativos a cada conjunto de dados, além de indicar os períodos anuais. Como se observa, o comportamento da subsidência obedece a um padrão de evolução com os valores de deslocamento alcançando 250 cm ao longo dos 25 anos de análise.

Nesse aspecto, a possibilidade de se reconhecer a longo prazo a evolução dos deslocamentos, permite identificar e direcionar melhor os estudos com vistas a reconhecer os mecanismos de ativação de risco e os fatores intervenientes a ocorrência de subsidência dos mais variados tipos. Nesse campo, a InSAR permite análises consistentes, auxiliando a compreensão e direcionando as intervenções *in situ* nos casos de monitoramento e investigações dos efeitos de subsidência a longo prazo.

Figura 43 - Séries temporais de deslocamento vertical de 1995–2020 de um alvo na bacia principal de subsidência



Fonte: Adaptado de Cigna e Tapete, 2021.

Sobre o tema de subsidência diversos outros trabalhos podem ser consultados na literatura técnica, a fim de conhecer os campos de estudo e potencialidades permitidas pela InSAR dentro do tema de subsidência. O Quadro 13 a seguir reúne trabalhos de relevante contribuição literária, com discussões de novas metodologias de análise dos dados InSAR e novas técnicas de processamento e imagens SAR.

Quadro 13 - Estudos sobre subsidência no mundo

Estudo	País	Missão	Algoritmo Processamento	Descrição
Dong <i>et al.</i> , (2021)	China	Sentinel-1	PS-InSAR	Monitoramento de deformações ao longo de canal de transposição de águas
Bao <i>et al.</i> , (2022)	China	Sentinel-1	PS-InSAR e SBAS	Monitoramento de subsidência em aeroporto, área urbana densificada.
Lin, (2022)	China	Sentinel-1	PS-InSAR	Estudo de evolução de subsidência devido a exploração de águas subterrâneas
Chen; Tong; Tan, (2020)	China	Sentinel-1 e TerraSAR-X	SBAS	Estudo analisa os efeitos da exploração de minas subterrâneas de carvão na ocorrência de subsidência
Hou <i>et al.</i> , (2021)	EUA	Sentinel-1	PS-InSAR	Estudo analisa a evolução de subsidência e avalia ferramentas computacionais para processamento de imagens
Radman; Akhoondzadeh; Hosseiny, (2021)	Irã	Sentinel-1	SBAS	Realiza uma análise de subsidência utilizando ferramentas de <i>machine learning</i> para avaliação dos dados SAR

5.3 MONITORAMENTO DE TALUDES

O monitoramento de taludes é uma atividade importante para prevenir deslizamentos de terra e outros tipos de movimentos de massa que possam colocar em risco a segurança de pessoas e infraestruturas próximas. Um dos aspectos mais importantes relacionados ao monitoramento dos taludes é a ocorrência de rupturas, que são eventos problemáticos, especialmente, quando se inserem em contextos urbanos, expondo populações ao convívio com o risco e a vulnerabilidade.

O gerenciamento de risco associado a taludes passa pela capacidade de previsão de rupturas que segundo Intrieri; Carlà; Gigli, (2019) pode ocorrer em escala regional usando o monitoramento de dados pluviométricos, geomorfológicos e hidrometeorológicos. E pode ser empregada uma abordagem geotécnica relacionando dados de deslocamento a partir de equipamentos como, inclinômetros e extensômetros.

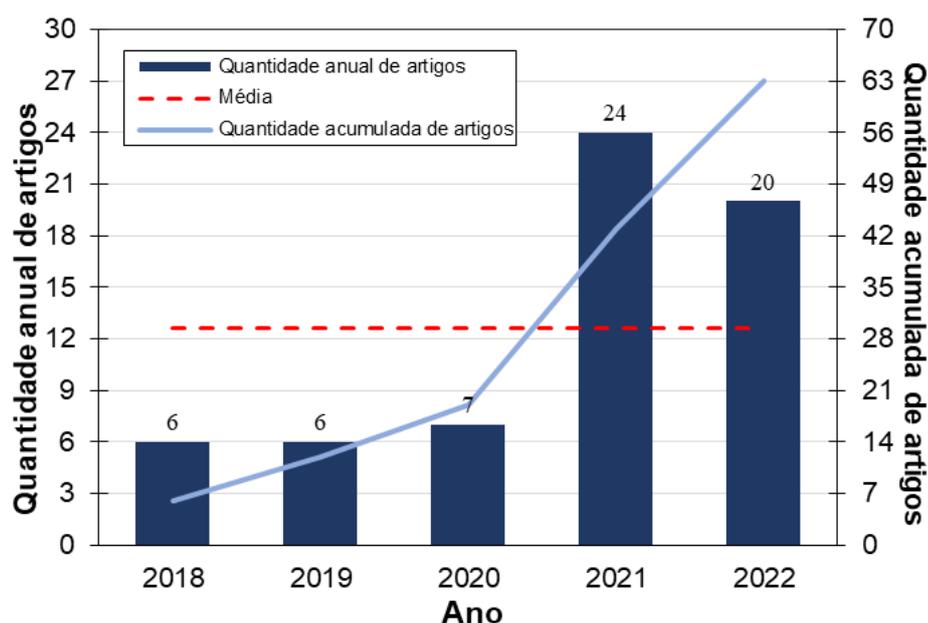
As técnicas de satélite InSAR aplicadas a taludes foram usadas, principalmente, para monitoramento de longo prazo, deformação do solo, mapeamento e inventários de deslizamentos de terra. Embora as primeiras aplicações tenham sido contidas devido às limitações na frequência de aquisição de dados, a evolução tecnológica tem garantido melhorias nos softwares de processamento o que reduz os efeitos temporais da análise. Como a InSAR é capaz de observar o cenário investigado em qualquer iluminação e condições meteorológicas, produzindo mapas de deslocamento em grande escala, com precisão milimétrica e sem acesso físico a área observada sua utilização no monitoramento de taludes tem sido muito relevante (INTRIERI; CARLÀ; GIGLI, 2019; HU *et al.*, 2021).

Mouratidis (2010) destaca que um efetivo sistema de monitoramento para deslizamentos em taludes deve compreender, mapas de deslocamento InSAR, gráficos de velocidade em pontos selecionados e mapas de deslocamento de base terrestre SAR, tomografia de Resistividade Elétrica (TRE) 2D / 3D, atualizado mapa de inventário de deslizamentos e detecção de movimento e mapas de suscetibilidade a deslizamentos. A implantação de técnicas eficientes e de meios que permitam a observação dos deslocamentos em escala local e regional permitem análises de médio e longo prazo e ajudam na fase de prevenção e mitigação dos riscos.

5.3.1 Resultados Bibliométricos

A partir das buscas realizadas na literatura sobre o tema de monitoramento de taludes usando a InSAR, foi possível construir a Figura 44 que reúne os levantamentos de publicações relativas aos últimos cinco anos (2018-2022). No total foram 63 publicações elegidas para o período, sendo possível observar que entre os anos de 2018 e 2020 o volume de publicações praticamente não se alterou com valores próximos de seis por ano. Entretanto, o volume de publicações cresce consideravelmente nos anos de 2021 (24 publicações) e 2022 (20 publicações), cabe destacar que para 2022 não se considera o ano inteiro, dado o período de buscas (setembro de 2022). Devido a essa discrepância do volume dos artigos a média anual de 12 artigos/ano não se torna representativa.

Figura 44 - Evolução do número de publicações na base de dados Scopus (2018 a 2022) sobre aplicação de InSAR em talude



Fonte: Autoria própria, 2022.

A Tabela 8 apresenta as instituições com ao menos três trabalhos publicados sobre o tema no período de análise, observando os dados é possível ter melhor compreensão das instituições com maiores volumes de publicações e os respectivos países. A *Northwest University* universidade norte americana possui o maior número de artigos publicados, seis no total. Também é possível destacar várias instituições chinesas e italianas, com diversos artigos sobre o tema fomentado por pesquisadores desses países reduzindo a concentração de publicações no continente asiático, de

modo a revelar as necessidades de estudos sobre o tema em diversas partes do mundo.

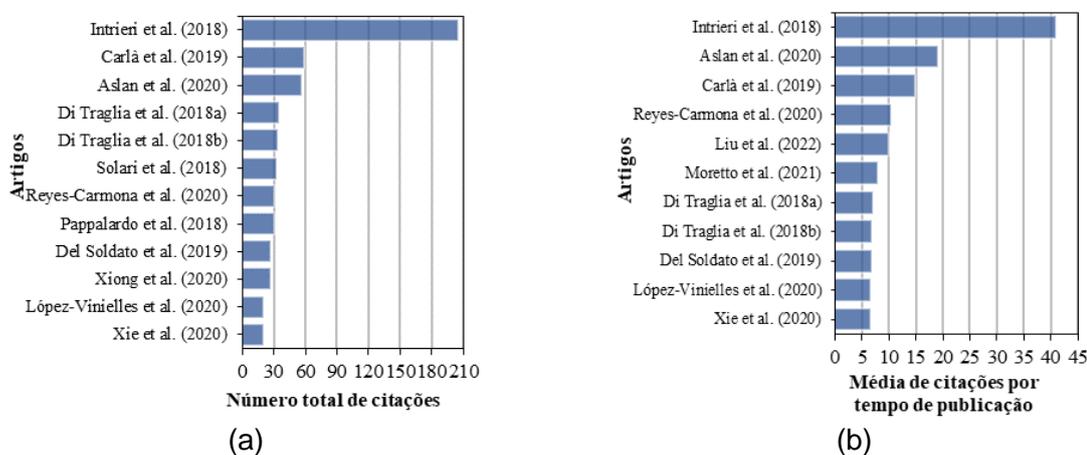
Tabela 8 - Principais instituições com publicações sobre aplicação de InSAR em talude

Instituições	País	Quantidade de artigos
Northwest University	Estados Unidos	6
Chengdu University of Technology	China	4
China University of Geosciences	China	4
Geoscience Research Department	Estados Unidos	4
Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia	Itália	4
Università Degli Studi Di Firenze	Itália	4
University of Florence	Itália	4
University of Padova	Itália	4
Wuhan University	China	4
Aerospace Information Research Institute	China	3
Universidad Politécnica de Madrid	Espanha	3
University of Alberta	Canadá	3
University of Chinese Academy of Sciences	China	3
University of Firenze	Itália	3

Fonte: Autoria própria, 2022.

A análise do volume de citações dos artigos ilustrada na Figura 40a mostra os resultados referente as 12 principais publicações em que o número de citações foi superior a 20. No total a quantidade de citações dos 63 artigos analisados correspondeu a 836, desse valor 578 citações foram referentes as 12 principais publicações que corresponde a 69% do volume considerado. Em uma análise considerando o tempo de publicação, é possível perceber que os trabalhos dos autores Intriери *et al.* (2018), Carlà (2019) e Aslan (2020) também aparecem entre os três mais citados, tais artigos possuem uma média de 15 a 42 citações por ano.

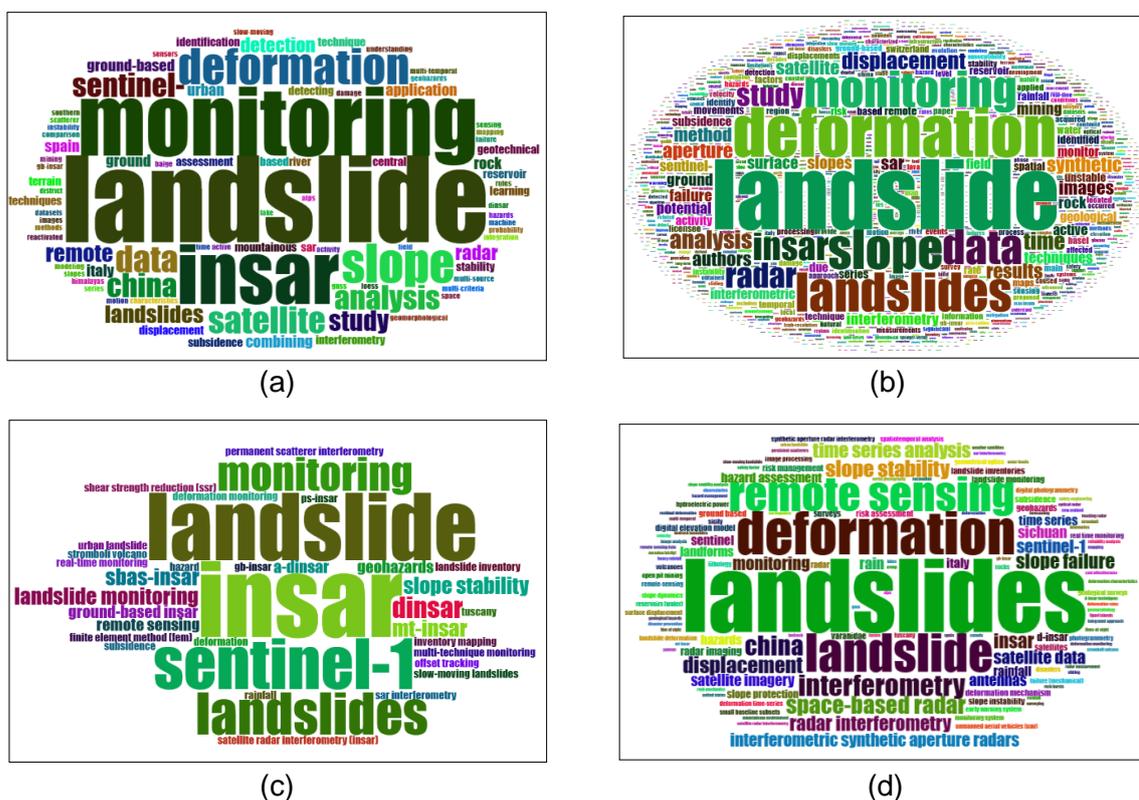
Figura 45 - Análise das citações dos artigos sobre aplicação de InSAR em talude: (a) 10 maiores quantidade de citações, 12 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 11 artigos



Fonte: Autoria própria, 2022.

As nuvens de palavras apresentadas na Figura 46a mostram os resultados das palavras que mais apareceram nos títulos dos trabalhos, landslide (29 repetições), monitoring (23 repetições) InSAR (20 repetições). Considerando as palavras que mais apareceram nos resumos (Figura 46b), aparecem landslide (189 repetições), deformations (134 repetições) e slope (106 vezes). Em relação as palavras-chave (Figura 46c e d) observa-se que aparecem algumas palavras como Sentinel-1 (12 repetições), remote sensing (21 repetições) e interferometry (1 repetições) que não embora não estejam diretamente relacionadas a chave de busca, mostram resultados alinhados ao objetivo da pesquisa.

Figura 46 - Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos; (c) das palavras-chave dos autores; (d) das palavras-chave da base de dados, sobre aplicação de InSAR em talude



Fonte: Autoria própria, 2022.

As análises dos metadados disponibilizados pela busca no site da Scopus também permite conhecer os periódicos mais importantes dentro do universo amostral escolhido. Dessa forma a Tabela 9 mostra a relação das cinco revistas com maior volume de publicações dentre os artigos analisados, destaca-se que ao todo foram 23 revistas reportadas na busca, mas 71,43% dos artigos foram publicados entre as cinco destacadas. Ressalta-se que a revista *Remote Sensing* sozinha responde por 41,27% dos artigos com 26 publicações. Outro fator a se destacar é a classificação brasileira

de indicador de qualidade (Qualis) em que todas as revistas destacadas apresentam conceito A1, o nível máximo pela avaliação brasileira. As revistas também se destacam nos outros indicadores de fator de impacto, com a *Engineering Geology* obtendo o melhor desempenho no CiteScore 2021 (10.7).

Tabela 9 - Principais periódicos com as métricas de impacto

Periódicos	Distribuição dos artigos		Métricas de impacto		Classificação Qualis/CAPES Engenharias I	
	Quantidade	Contribuição	CiteScore 2021	Journal Citation Reports (JCR) 2021	Quadriênio 2013-2016	Quadriênio 2017-2020
1 Remote Sensing	26	41,27 %	7.4	5.349	B1	A1
2 Landslides	10	15,87 %	10.6	6.153	A1	A1
3 Engineering Geology	4	6,35%	10.7	6.902	A1	A1
4 Frontiers in Earth Science	3	4,76%	3.2	3.661	B4	-
5 IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	2	3,17%	6.4	-	A2	A1
Total	45	71,43 %	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2022.

5.3.2 Casos da Literatura

A análise temporal dos deslocamentos no estudo de taludes é a principal característica para compreensão dos mecanismos de atividade e previsão de rupturas. Nesse sentido, a InSAR permite explorar espacialmente grandes áreas e identificar zonas de aumento de deslocamento.

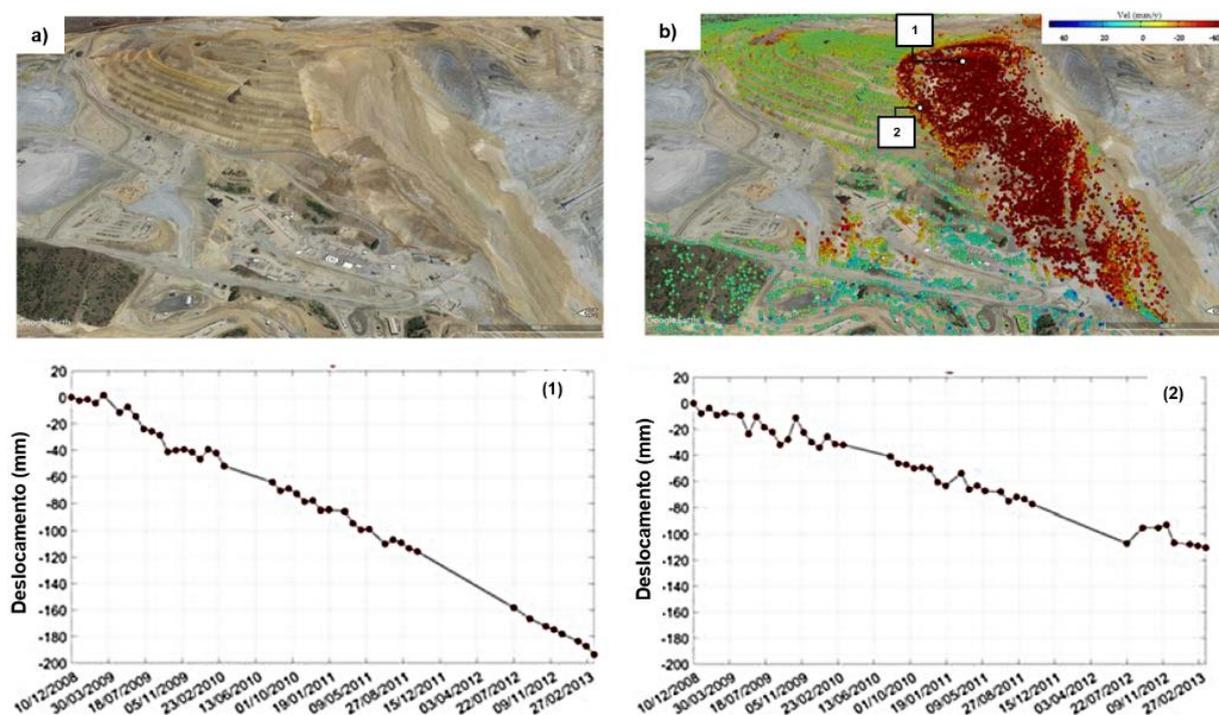
5.3.2.1 Estudo da aplicação da InSAR em Talude de Mineração

No estudo de Moretto; Bozzano; Mazzanti (2021), os autores apresentam resultados pré-falha de zonas de instabilidade de talude da Mina de Bingham Canyon (EUA) que sofreu uma ruptura em 10 abril de 2013. Foi analisada uma pilha de 44 imagens ascendentes RADARSAT-2, coletadas entre outubro de 2009 e abril de 2013 e analisadas por meio da técnica de A-DInSAR.

Moretto; Bozzano; Mazzanti (2021) destacam na Figura 47a o local de ruptura da mina, na Figura 47b os pontos interferométricos relativos à velocidade LOS na região de ruptura e nas adjacências do talude para o período de análise. Em destaque são apresentados dois pontos 1 e 2, cujas séries temporais são exibidas em sequência na Figura 47. Os resultados mostram tendências claras de aumento do deslocamento na região da falha, com valores da ordem de 195 mm (ponto 1) e 110 mm (ponto 2).

Segundo os autores, esses resultados permitiram identificar as áreas afetadas pelo aumento dos deslocamentos, entretanto, a análise A-DInSAR não conseguiu estimar com precisão a intensidade dos deslocamentos. Nesse sentido, os autores concluíram que a análise A-DInSAR permitiu identificar a área afetada pelas deformações, mas não permitiu estimar com precisão a intensidade dos deslocamentos. Os autores chamam atenção para resultados possivelmente subestimados dos deslocamentos, tendo em vista as capacidades de análise da técnica A-DInSAR.

Figura 47 - (a) Vista de deslizamento de terra; (b) Análise de pré-falha A-DInSAR para o deslizamento; (1) e (2) medições de séries temporais de deslocamentos

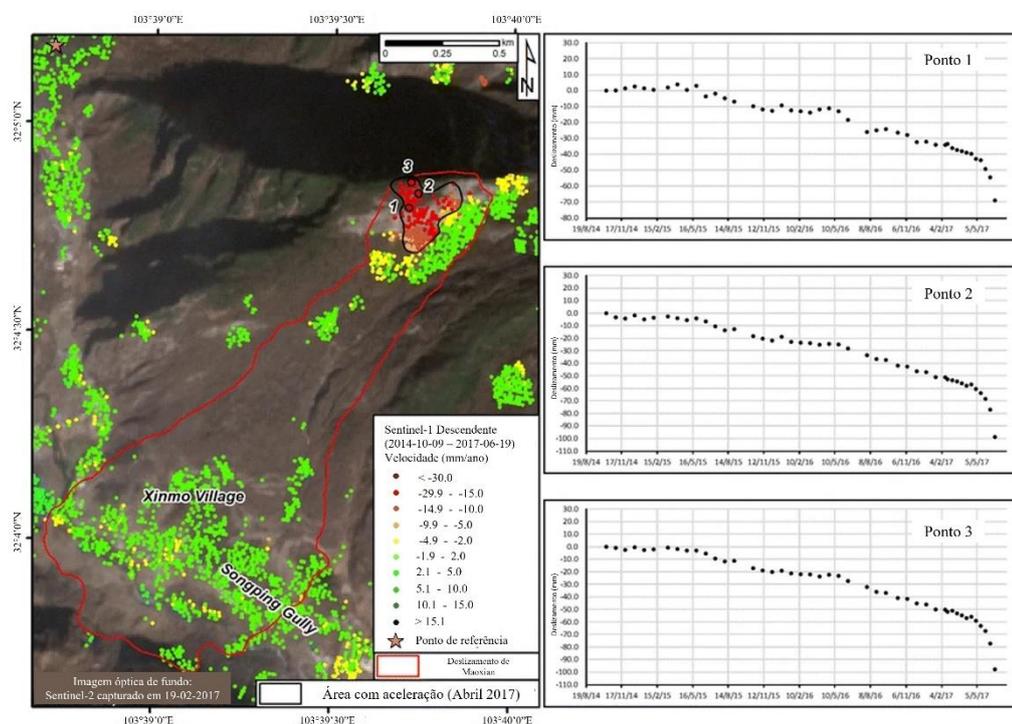


Fonte: Adaptado de Moretto; Bozzano; Mazzanti (2021).

5.3.2.2 Estudo da aplicação da InSAR em Taludes ocupados

O desenvolvimento de novas técnicas de processamento dos dados interferométricos tem sido objeto de constantes estudos, especialmente, quanto ao monitoramento de taludes por meio da InSAR. Nesse sentido, muitos autores como Frattini *et al.*, (2018), Di Traglia *et al.*, (2018), Solari *et al.*, (2018a) e Muhammad *et al.*, (2022), tem buscado implementar análises com modernos algoritmos de processamento dentre eles a tecnologia SqueeSAR (FERRETTI *et al.*, 2011) visando aumentar as capacidades de acompanhamento da interferometria.

Figura 48 - Mapa de deformação do solo pré-evento para o deslizamento de Maoxian



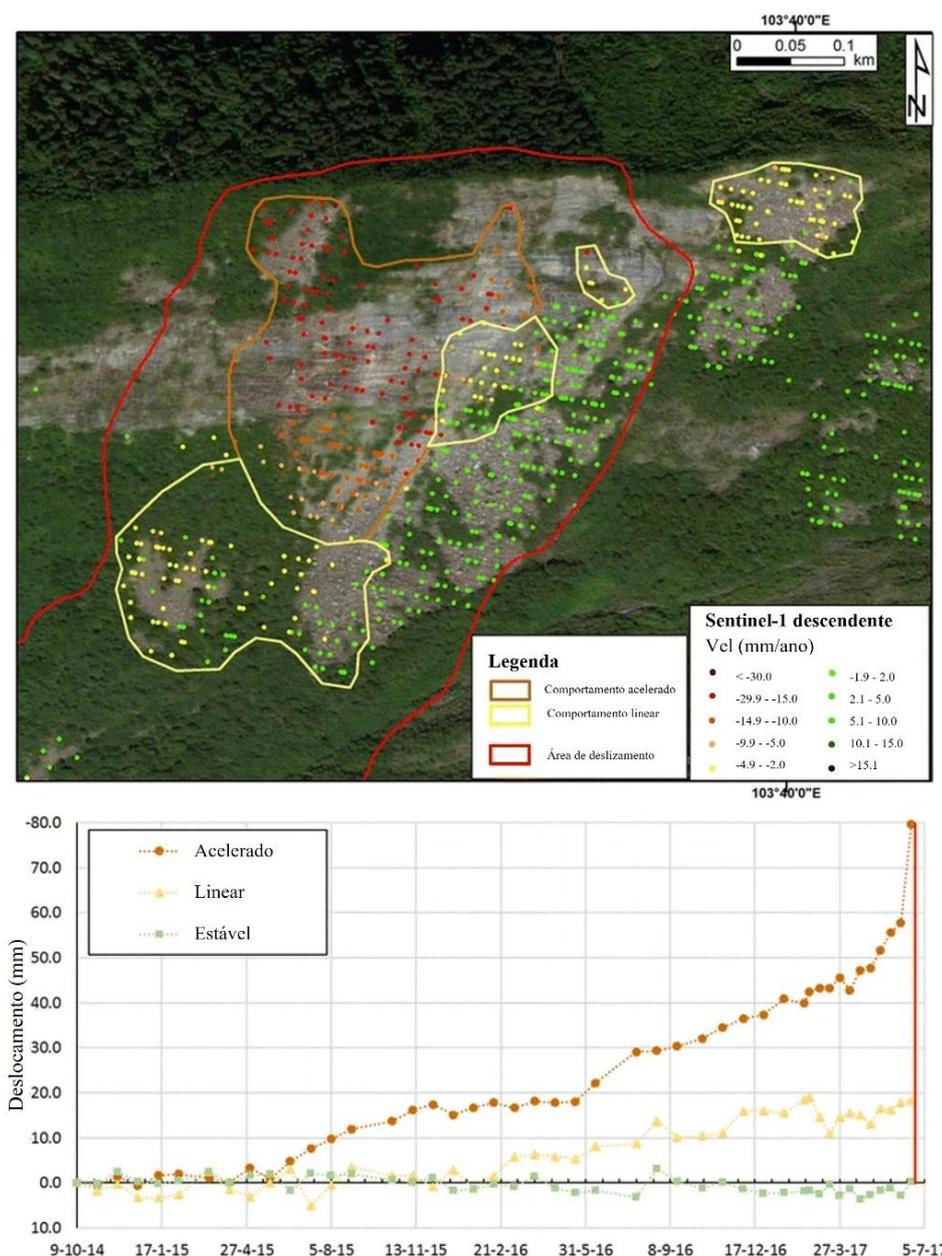
Fonte: Adaptado de Intriери *et al.*, 2018.

Em estudo sobre deslizamentos em taludes empregando o algoritmo SqueeSAR os autores (INTRIERI *et al.*, 2018) analisaram 45 imagens LOS a partir de dados Sentinel-1 para o período de 09 de outubro de 2014 a 19 de junho de 2017, referente a um deslizamento de grande intensidade que ocorreu em 24 de junho de 2017 e vitimou mais de 100 pessoas no vilarejo de Xinmo, China. A aquisição foi realizada com intervalos de revisita inicialmente a cada 24 dias, depois 12 dias e a partir das combinações dos satélites Sentinel-1A e Sentinel-1B, intervalos de 6 dias.

Nas análises propostas, os autores apresentam resultados de pontos interferométricos da área de ocorrência de deslizamento antes da falha. Na Figura 48

é possível ver a área do deslizamento (polígono vermelho) e a região onde se concentram os pontos com maiores velocidades de deslocamento (polígono preto) com alguns pontos apresentando valores da ordem de 27 mm/ano. Os pontos 1, 2 e 3 marcados dentro da área de maior movimentação tem suas respectivas séries de deslocamento apresentadas, cujos valores do deslocamento são próximos de 100 mm, para o período de análise.

Figura 49 – Localização das áreas de análise e evolução do deslocamento



Fonte: Adaptado de Intriery *et al.*, 2018.

Na Figura 49 é possível perceber três faixas de deslocamento com destaque para o polígono laranja, que reúne os maiores valores de deslocamento (2 mm/dia) e os pontos indicativos do início da aceleração do movimento que segundo os autores

foi em 20 de abril de 2017 (data da última aquisição da interferometria). Os demais polígonos em amarelo mostram pontos interferométricos com deslocamentos identificados como comportamento linear (cor amarela) e aqueles identificados como estabilidade (cor verde)

Os autores apontam para uma clara possibilidade de usar dados interferométricos para análise do comportamento de deslocamentos em taludes e a integração desses dados com outras informações de monitoramento a fim de mitigar os riscos naturais. As técnicas de processamento empregadas no estudo também indicam para significativas melhorias na densidade de pontos InSAR e capacidade de análise temporal dos dados.

5.3.2.3 Estudo da aplicação da InSAR em Taludes de Áreas Urbanas

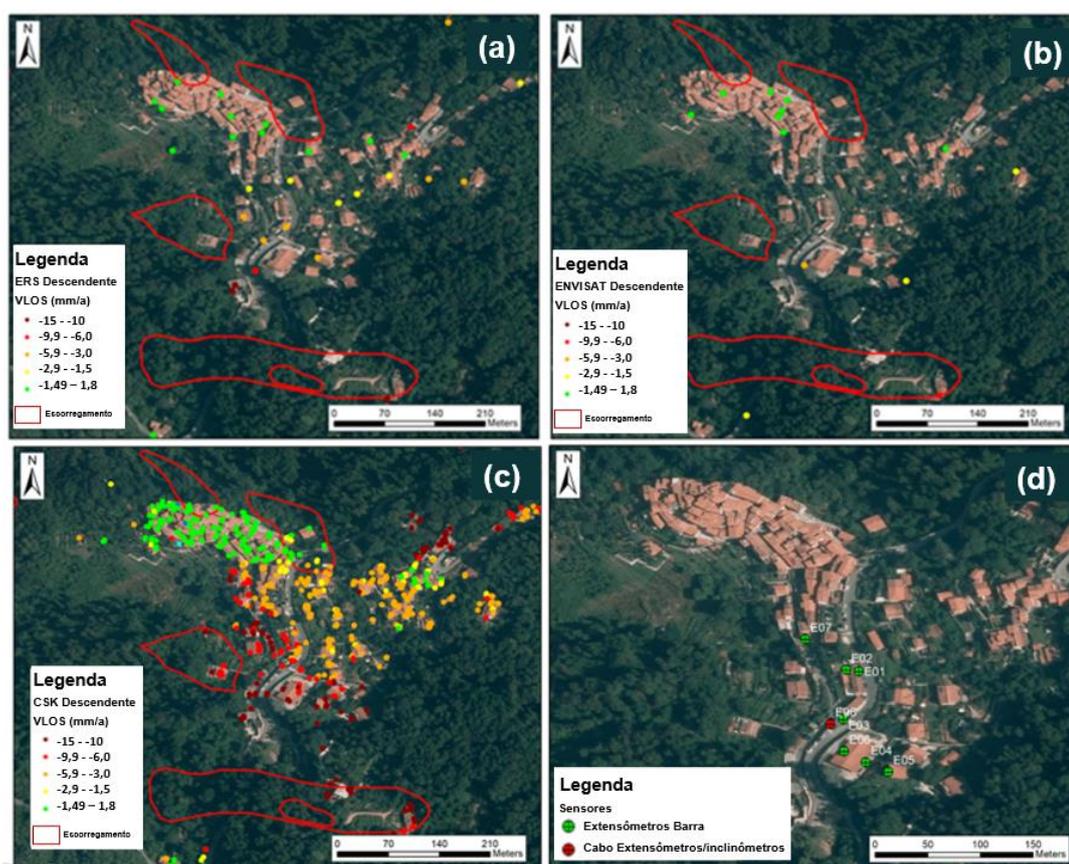
A compreensão da evolução espacial e temporal dos deslocamentos é um fator importante na compreensão das modificações em taludes. Os autores Ciampalini *et al.*, (2021) realizaram um estudo visando compreender a evolução dos deslocamentos ocorridos em uma área de relevo acidentado (encosta natural ocupada) localizada na parte norte-ocidental da região da Toscana (Itália) entre 1992 até 2020.

Foram utilizadas imagens de diferentes satélites e para diferentes períodos, buscando compor um entendimento de longo prazo dos deslocamentos e auxiliar na implementação de outros tipos de instrumentação geotécnica (extensômetros e inclinômetros). No estudo foram usados dados dos satélites ERS 1/2 (1992 a 2000) da banda C, do Envisat (2003 a 2010) e do COSMO-SkyMed (CSK) da banda X (2010 a 2014). Os autores também usaram imagens do satélite Sentinel-1A (2016 a 2017) e Sentinel-1B (2017 a 2020), que foram empregadas em uma análise híbrida, entre os dados SAR e deslocamentos adquiridos pelos sensores geotécnicos.

Na Figura 50 é possível identificar os resultados históricos (1992 a 2014) do conjunto de dados (ERS, Envisat e COSMO-SkyMed) LOS descendente. Os autores levantaram informações de inventários de deslizamentos ocorridos em épocas anteriores (polígonos vermelhos na figura) e perceberam que os dados InSAR indicaram deformações para além das áreas indicadas de deslizamento e que tem relação com a ocorrência de movimentos gravitacionais com um componente principal para a direção sudoeste.

Para Ciampalini *et al.*, (2021) a região sudoeste da vila é afetada por deformações do solo cuja velocidade média aumentou entre 1992 e 2014, crescendo de uma taxa de deformação média de 5,18 mm/ano (ERS) para uma taxa média de deformação de 6,4 mm/ano (CSK). A identificação das áreas com maiores taxas de deslocamento, permitiu direcionar a implantação de sensores geotécnicos (Figura 50a) visando associar informações de deslocamento a partir de instrumentos distintos, assim, a instrumentação *in situ* dos extensômetros e inclinômetros ocorreu em 2016, junto com início das informações do satélite Sentinel-1.

Figura 50 – Dados LOS Descendente: (a) ERS (1992 a 2000); (b) Envisat (2003 a 2010); (c) COSMO-SkyMed (2010 a 2014) e (d) localização dos extensômetros e inclinômetros

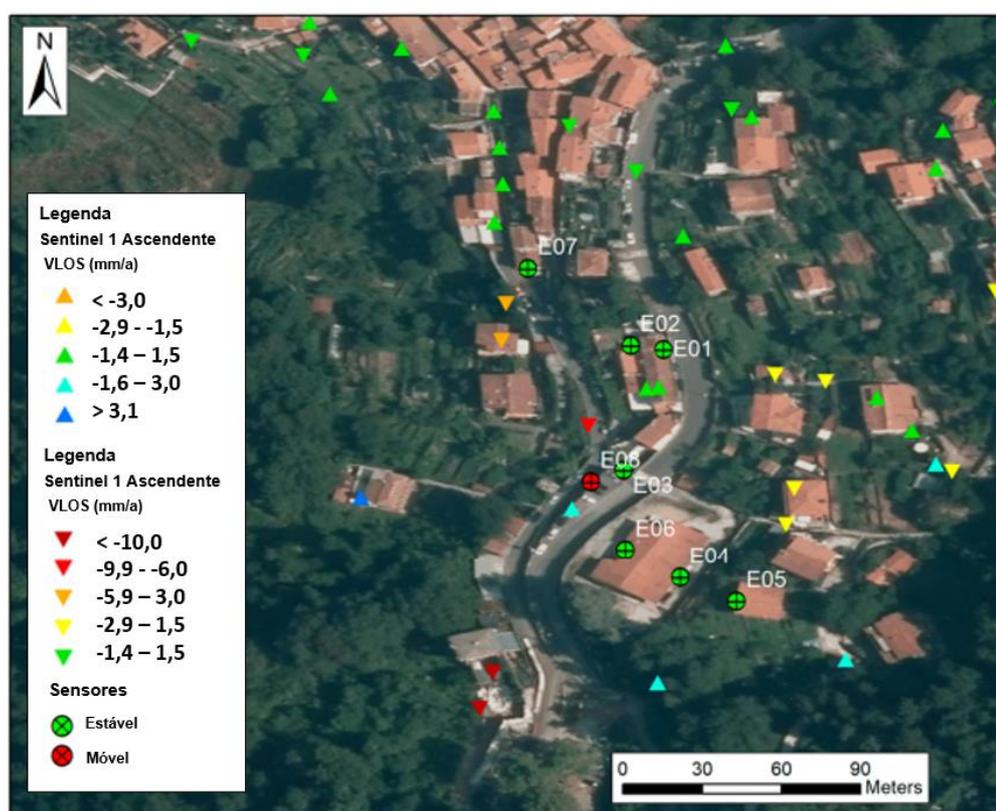


Fonte: Adaptado de Ciampalini *et al.*, (2021).

Segundo os autores, devido a geometria da encosta afetada pelo deslizamento, o LOS do radar sensor em órbita ascendente não é ideal em relação à direção do movimento, podendo subestimar os deslocamentos horizontais devido a inclinação (Figura 51a). Entretanto, a visão ao longo da órbita do LOS descendente é mais adequada quando considerando a direção do movimento, permitindo uma medição mais confiável do deslocamento real (Figura 51b).

Os dados Sentinel-1 foram então comparados com as deformações registradas pelos instrumentos do monitoramento geotécnico, além de registros pluviométricos adquiridos ao longo do período de análise (2016 a 2020). Os resultados (Figura 52) demonstram que as tendências de deformação e os períodos de aceleração do deslizamento são identificados corretamente por todos os sensores. Os dados do inclinômetro (Figura 52a) mostram uma superfície deslizante a uma profundidade de 23 m, com deslocamento máximo de até 20 mm em 2017–2020 e uma superfície deslizante secundária a uma profundidade de 5 m do nível do solo, resultando em um total deslocamento acumulado na superfície de cerca de 36 mm no mesmo período.

Figura 51 – Comparação espacial entre os dados MT-InSAR Sentinel 1 e a deformação medida pela rede de sensores sem fio

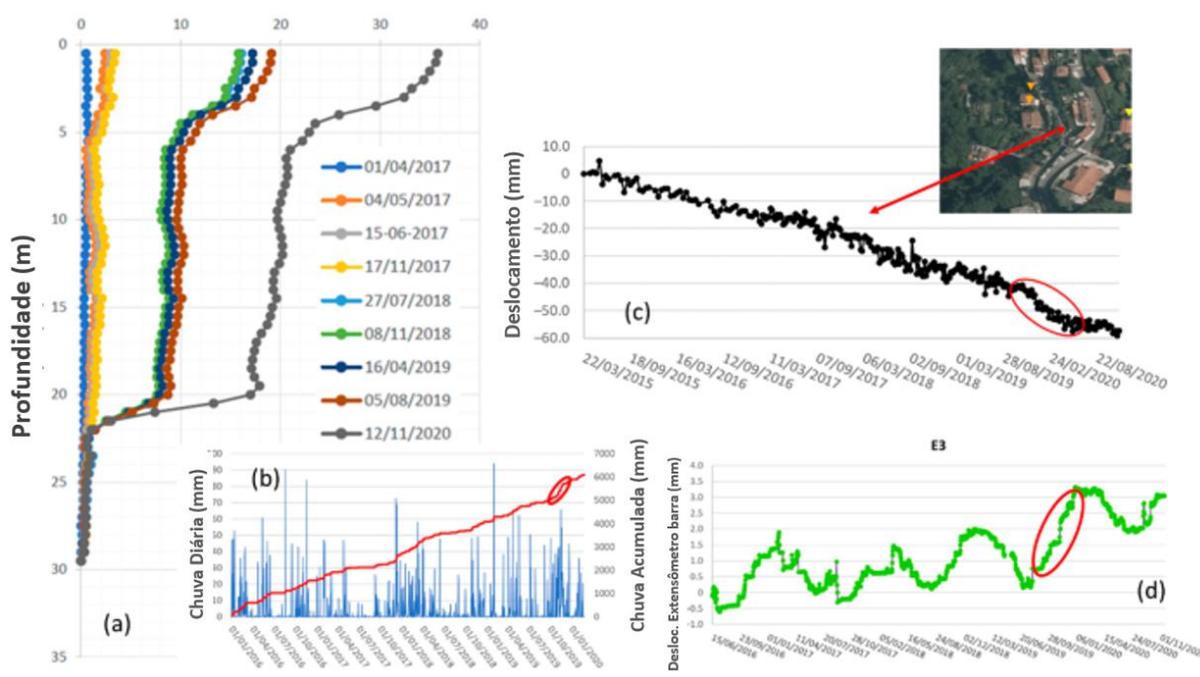


Fonte: Ciampalini *et al.*, (2021).

Para Ciampalini *et al.*, (2021), essas alterações detectadas no inclinômetro corroboram o diagnóstico de que as chuvas de longa duração provocam aumento na taxa de deslocamento, comportamento que é registrado por todos os sensores pertencentes ao sistema de monitoramento. Em destaque (elipse cor vermelha) na Figura 52, o período de novembro de 2019, após chuvas intensas (Figura 52b), mostra uma aceleração na deformação que foi detectada por dados MT-InSAR ascendentes e descendentes, dados extensômetros, e dados do inclinômetro.

Na Figura 52c é possível observar uma aceleração na série de deslocamento próxima do ponto extensômetro E3 (ver Figura 51) para o período de destaque de chuvas intensas. Além disso, os resultados do extensômetro E3 (Figura 52c) mostram de maneira evidente a mesma tendência de aumento do deslocamento. Segundo os autores, os resultados mostram uma boa concordância na distribuição espacial e temporal das deformações por ambos os sistemas de monitoramento, com uma boa correlação entre eles. A comparação entre os dados de deformação e os dados de precipitação sugerem ser responsáveis pelas acelerações identificadas na taxa de deformação do deslizamento.

Figura 52 – Resultados de deslocamento dos instrumentos geotécnicos e dados Sentinel-1



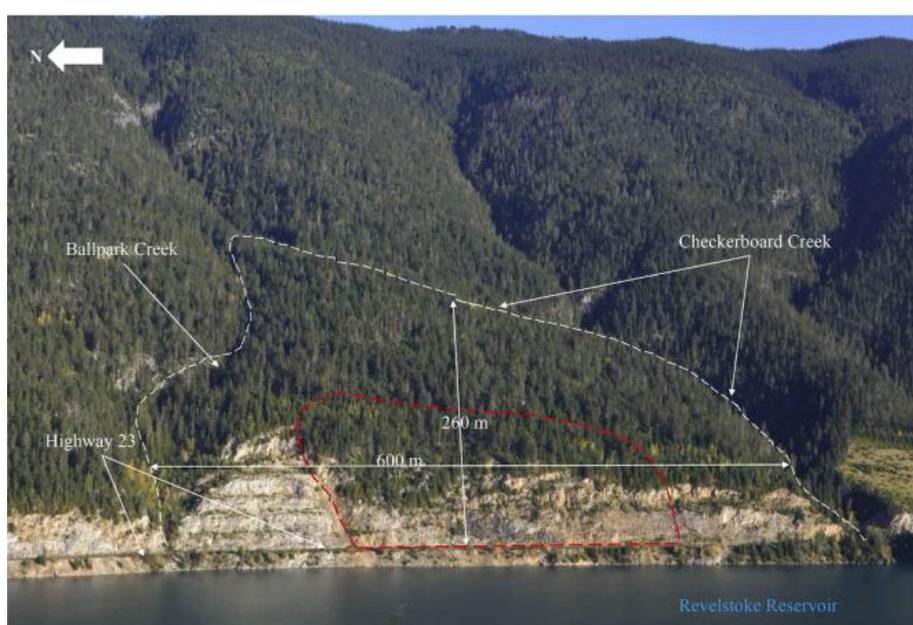
Fonte: Ciampalini *et al.*, (2021).

5.3.2.4 Estudo sobre emprego do GB-InSAR para monitoramento de talude

O emprego da tecnologia de radar interferométrico baseado em solo, tem se notabilizado nas aplicações em taludes, tendo em vista seus princípios de funcionamento e os mecanismos de ação de perigos nesses casos. Os autores Woods *et al.*, (2021), realizaram um estudo utilizando o GB-InSAR para monitorar um talude natural, e verificar zonas de instabilidade, dentro dos limites de um reservatório de uma barragem na China.

Para o monitoramento foi empregado o radar IBIS-L GB-InSAR, fabricado pela IDS Georadar. Segundo os autores, o período de imageamento ocorreu entre setembro de 2016 a setembro de 2019. Devido a algumas intercorrências durante esse período, como manutenção do equipamento e desafios operacionais, não foi possível realizar o registro de forma contínua. Foram então realizadas 25 campanhas de imageamento, com duração de uma a duas semanas e intervalos entre aquisições de até dois meses. A Figura 53, mostra a localização do talude e a posição do radar de solo na margem oposta, de onde foram realizadas as aquisições de imagens.

Figura 53 – Localização do talude: polígono branco demarca área de interesse e o polígono vermelho área ativa dos deslocamentos



Fonte: Adaptado de Woods *et al.*, (2021).

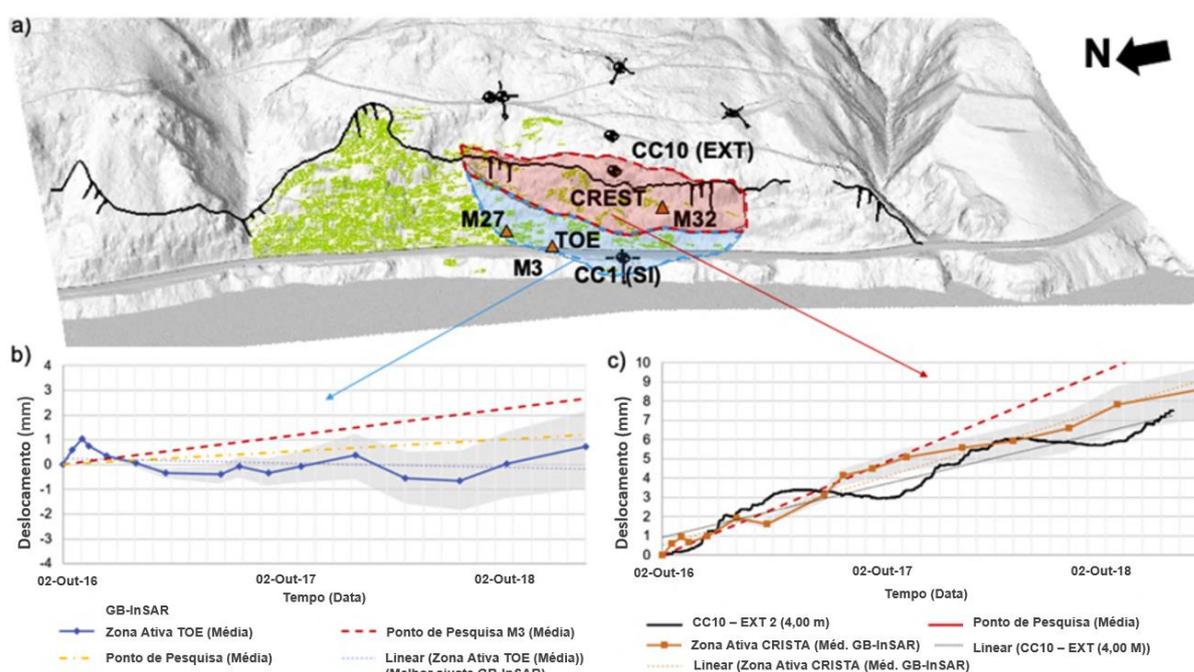
Na área de estudo também foram instalados equipamentos pontuais, como extensômetros e medidores de nível d'água. Nas análises os autores relacionam dos deslocamentos obtidos pelo GB-InSAR com os equipamentos *in situ* (extensômetros), mostrando duas zonas de análise (Figura 54a), uma na região da crista (região vermelha) e outro no pé do talude (região azul). Uma regressão linear e intervalos de confiança de 95% também são mostrados (áreas cinzas).

Woods *et al.*, (2021) afirmam que o deslocamento cumulativo médio no LOS durante o período de monitoramento foi de 0,7 mm para a base da encosta e 8,6 mm para a crista. As análises (Figura 54b) também permitem inferir que o deslocamento

cumulativo final de 0,7 mm é consistente com o ponto de pesquisa M27 e aproximadamente um terço de M3 (ambos localizados na área do pé).

Para o deslocamento LOS cumulativo na crista do corte da rocha também se verifica consistência em relação aos resultados dos extensômetro CC10 e no ponto de pesquisa M37 (Figura 54c). Embora esses valores médios sejam geralmente consistentes, as taxas totais de deslocamento GBInSAR no LOS são menores do que as taxas máximas de deslocamento observadas na zona ativa (entre 5 mm/ano e 15 mm/ano).

Figura 54 - Deslocamentos GB-InSAR médios cumulativos (LOS) na crista e na base do talude e melhor ajuste linear durante o período de monitoramento



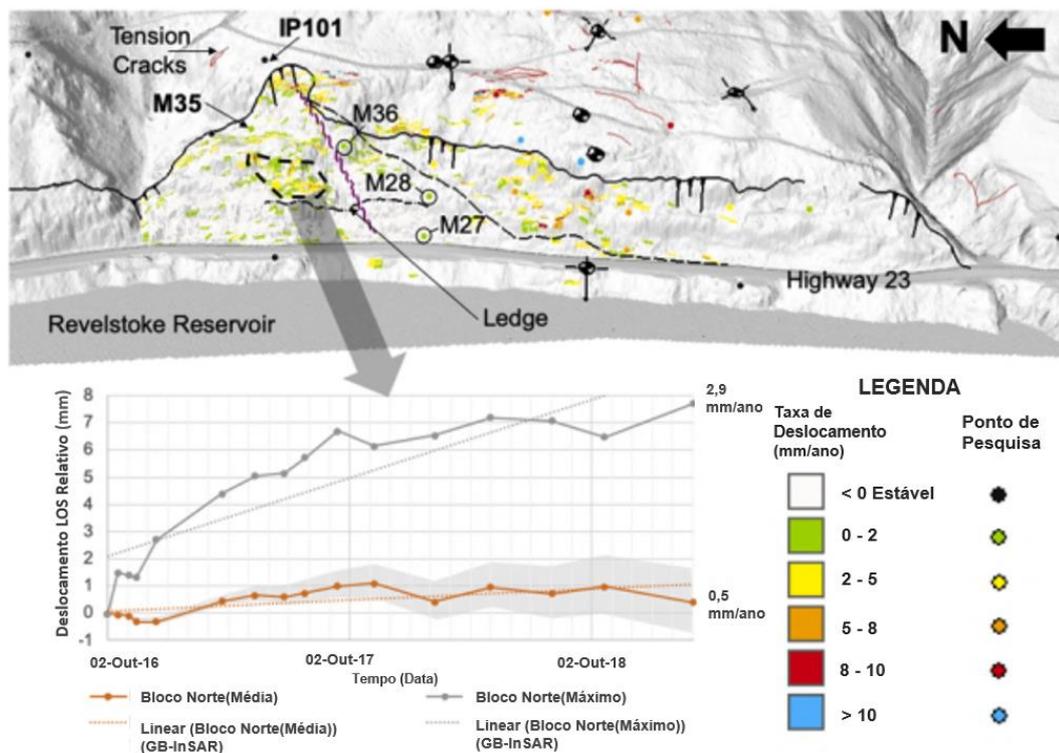
Fonte: Adaptado de Woods *et al.*, (2021).

Os autores destacam que os resultados do GB-InSAR permitiram identificar uma aceleração na região destacada pelo polígono preto (Figura 55a), esta área indica uma zona ativa no centro do talude segundo os dados GB-InSAR e levantamento histórico da instrumentação. A taxa média de deslocamento desta área é da ordem de 0,6 a 1,5 mm/ano, embora valores máximos tenham sido registrados como 2,9 mm/ano.

Segundo Woods *et al.*, (2021) profundidade e, portanto, o volume deste bloco potencialmente móvel não pode ser determinado devido à natureza bidimensional dos dados GB-InSAR e pode representar uma característica de risco potencial de queda/deslizamento de rocha rasa. Essa descoberta levou a um interesse em avaliar

ainda mais o potencial de um bloco ativo em desenvolvimento nessa área por meio do monitoramento InSAR contínuo.

Figura 55 - Taxa de deslocamento de LOS entre setembro de 2016 e setembro de 2017



Fonte: Adaptado de Woods *et al.*, (2021).

Existem diversos trabalhos na literatura técnica que abordam o tema de taludes e exploram as possibilidades de uso da InSAR. O Quadro 14 apresenta alguns desses estudos relevantes, que discutem novas metodologias de análise de dados InSAR e técnicas avançadas de processamento de imagens SAR.

Quadro 14 - Estudos sobre Taludes no mundo usando a InSAR

Estudo	País	Missão	Técnica Processamento	Descrição
(ESCAYO <i>et al.</i> , 2022)	Espanha	Sentinel-1A	A-DInSAR	Combinação de dados InSAR de visadas ascendentes e descendentes para monitoramento de deformações de rochas em mina
(WANG <i>et al.</i> , 2022)	China	ALOS PALSAR	SBAS	Mapeamento de encostas instáveis para composição de inventário de deslizamentos usando dados InSAR
(CHEN <i>et al.</i> , 2021)	Itália	Sentinel-1A	MT-InSAR (PS e SBAS)	Combina do MT-InSAR, GNSS, TLS e SfM no monitoramento de edifícios e processos geológicos que afetam sua estabilidade
(TANG; MOTAGH; ZHAN, 2020)	Alemanha	Sentinel-1A e TerraSAR-X	SBAS	Mapeamento de deslocamento do solo e instabilidade de taludes de minas a céu aberto, para fornecer soluções de monitoramento para operações
(CARLÀ <i>et al.</i> , 2019a)	Itália	Sentinel-1A	PSInSAR	Integração de dados de monitoramento de diferentes fontes (GNSS, satélite InSAR e GBInSAR) para monitoramento de encostas e prevenção de deslizamento de terra
(HSIEH; LIN, 2020)	Taiwan	ALOS	PSInSAR	Monitoramento de regiões com edificações em uma grande encosta e propõe um conjunto de procedimentos de monitoramento hierárquico
(CARLÀ <i>et al.</i> , 2018a)	Itália	Sentinel-1A	PSInSAR	Monitoramento de talude de mineração e análise de deslizamento utilizando dados InSAR
(ASLAN <i>et al.</i> , 2020)	França	Sentinel1-A	PSInSAR	Análise de deslizamentos de terra, atualização de mapas de inventário e características geométricas de dados InSAR para medir movimentos de talude em áreas montanhosas

5.4 MONITORAMENTO DE BARRAGENS

O rompimento de barragens é uma modalidade de desastres consideravelmente recorrente na história. Dois são os principais fatores que podem ser apontados como primários desse evento: o advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou a falta de inspeção contínua da estrutura ao longo do seu período de operação. Um extenso programa de medições pode ser configurado, para registrar o comportamento de curto e longo prazo dos deslocamentos na barragem (GUO *et al.*, 2021).

Para garantir sua estabilidade estrutural e prolongar sua vida útil é fundamental o monitoramento do deslocamento. Isto requer o uso de vários dispositivos de monitoramento para acompanhar uma ampla gama de parâmetros, incluindo deslocamentos no corpo da barragem, temperatura, pressão dos poros, taxas de infiltração e drenagem, e níveis piezométricos, entre outros (REGUZZONI *et al.*, 2022).

O acompanhamento da barragem é uma atividade importante para detectar precocemente sinais de instabilidade e auxiliar no planejamento de operações de manutenção. A detecção precoce da instabilidade de uma barragem deve constituir um componente chave de qualquer plano de manutenção de barragem e pode levar à estabilização estrutural para evitar que qualquer aviso inicial se transforme em desastre (ROQUE *et al.*, 2021a).

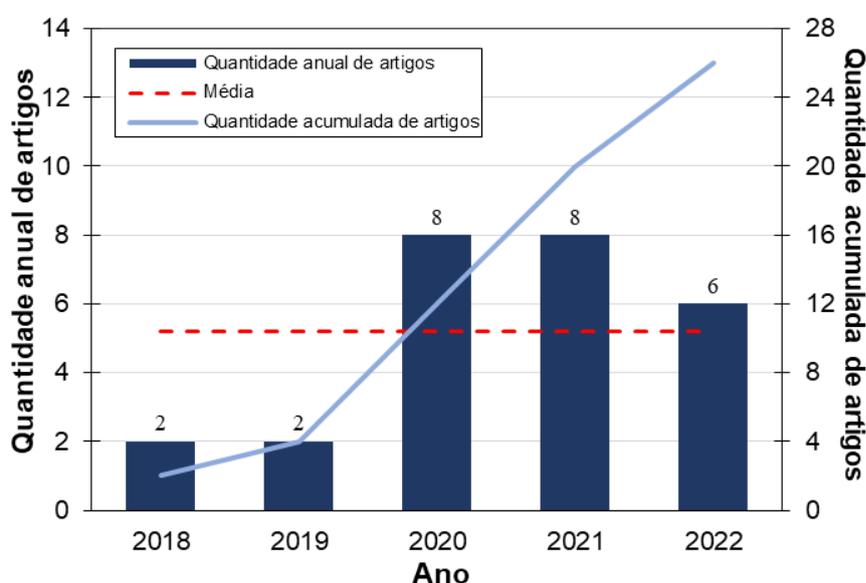
Os autores Reguzzoni *et al.*, (2022), destacam também que para avaliar as variações geométricas da barragem e seu entorno, as técnicas usuais consistem em monitorar um grupo de Pontos de Controle (CPs) definidos em posições estratégicas (como o topo da barragem, taludes de jusante), a fim de obter informações sobre o comportamento geral da estrutura.

Programas de monitoramento de barragens empregam sensores tradicionais de contato, como extensômetros, acelerômetros e inclinômetros. Embora, com os avanços das técnicas de sensoriamento remoto, são empregados novos métodos como a InSAR, que possibilita o acompanhamento do corpo da barragem, incluindo a crista, as ombreiras e áreas adjacentes. Além disso, são empregados fotogrametria (uso de drones), varredura a laser e estações totais robóticas e sistema GNSS também pode ser utilizado, seja de forma fixa na estrutura da barragem, como também de forma móvel, realizando acompanhamento rotineiros (MALTESE *et al.*, 2021).

5.4.1 Resultados Bibliométricos

Os resultados das buscas na plataforma da Scopus para o tema de monitoramento de barragens usando a InSAR, após todas as etapas de elegibilidade e filtros aplicados são apresentados na Figura 56. É possível perceber um aumento no número de publicações ao longo dos anos últimos cinco anos, com um valor acumulado de 26 publicações. Apesar de 2018 e 2019 registrarem apenas 2 artigos, em 2020 e 2021 observa-se um total de 8 artigos, já a quantidade de artigos de 2022 pode não representar a totalidade do ano, tendo em vista que a pesquisa foi realizada em setembro de 2022.

Figura 56 - Evolução do número de publicações na base de dados Scopus (2018 a 2022) sobre aplicação de InSAR em barragem



Fonte: Autor (2022).

Analisando os resultados de indexação com registro de instituições ao redor do mundo, observa-se por meio da Tabela 10 as universidades e seus respectivos países. Ao todo foram 60 instituições reportadas, embora nos resultados em sequência foram eleitas aquelas que tiveram ao menos 2 artigos publicados no tema. Essas instituições são responsáveis por 22,06% do volume total de publicações. Em destaque a Universidade de Wuhan na china, que tem três artigos publicados e mais uma vez forte predominância chinesa nos resultados de publicações (7 artigos). O Reino Unido tem 6 publicações ao todo e a Alemanha 2 publicações.

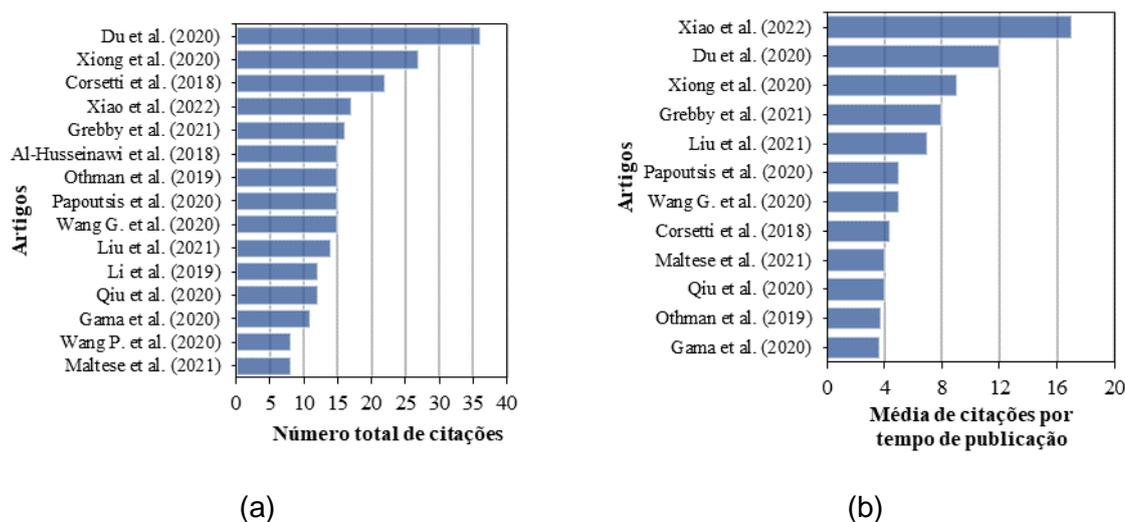
Tabela 10 - Principais instituições com publicações sobre aplicação de InSAR em barragem

Instituições	País	Quantidade de artigos
Wuhan University	China	3
Central South University	China	2
Chang'an University	China	2
Durham University	Reino Unido	2
Friedrich Schiller University Jena	Alemanha	2
Newcastle University	Reino Unido	2
University of Nottingham	Reino Unido	2

Fonte: Autor (2022).

Um outro dado importante relacionado as publicações é o número de citações dos trabalhos. Dentre os 26 artigos elegidos o total de citações foi de 271, na Figura 57a são apresentados os 15 trabalhos com as maiores quantidades de citações, com destaque para o trabalho de Du *et al.* (2020) que possui 36 citações (13% do total) indexadas na plataforma da Scopus. Na Figura 57b, são apresentados os resultados de citações por tempo de publicação do artigo, percebe-se que a maioria dos trabalhos mais citados aparecem nesta classificação. Cabe destacar também, que em ambas os resultados apresentados aparecem o trabalho dos autores Brasileiros Gama *et al.* (2020) sobre análise da barragem de rejeitos em Brumadinho, Minas Gerais.

Figura 57 - Análise das citações dos artigos sobre aplicação de InSAR em barragem: (a) 10 maiores quantidade de citações, 15 artigos; (b) 10 maiores médias de citações por tempo de publicação, 12 artigos



Fonte: Autor (2022).

A Figura 58 mostra as nuvem de palavras dos títulos, resumos, definidas pelos autores e pelas revistas. Na Figura 58a é possível ver menos palavras em relação as

desempenho e qualidade. Pela nova qualificação brasileira (Qualis/CAPES) as revistas apresentam excelente desempenho científico.

Tabela 11 - Principais periódicos com as métricas de impacto

Periódicos	Distribuição dos artigos		Métricas de impacto		Classificação Qualis/CAPES Engenharias I	
	Quantidade	Contribuição	CiteScore 2021	Journal Citation Reports (JCR) 2021	Quadriênio 2013-2016	Quadriênio 2017-2020
1 Remote Sensing	10	38,46 %	7.4	5.349	B1	A1
2 Bulletin of Engineering Geology and the Environment	2	7,69%	5.8	-	A2	A2
3 Energy Geoscience	2	7,69%	-	-	-	-
4 Sensors (Switzerland)	2	7,69%	6.4	3.847	A2	A2
Total	16	61,54 %	-	-	-	-

Fonte: Autor (2022).

5.4.2 Casos da Literatura

A seguir, serão apresentados alguns casos em que a técnica de Interferometria (InSAR) foi utilizada para análise de deslocamentos em barragens, proporcionando benefícios na detecção, controle e monitoramento dos deslocamentos de superfície. Além disso, ela também auxiliou na gestão de riscos e perigos.

5.4.2.1 Estudo da aplicação da InSAR em Barragem de Rejeitos

O monitoramento de barragens de rejeitos tem sido uma grande preocupação, especialmente no Brasil, devido aos graves acidentes ocorridos em barragens de contenção de rejeitos de minério de ferro. A instrumentação geotécnica em barragens de rejeitos contempla uma gama de instrumentos como: piezômetros, extensômetros, acelerômetros, inclinômetros, medidores de nível de água e outros.

Nas abordagens do emprego da InSAR para monitoramento de barragens de rejeitos Du *et al.*, (2020) destacam que a observação de séries temporais de longo prazo é necessária para obter o conhecimento das causas potenciais de subsidência e os impactos associados. Dessa forma, a aplicação da interferometria SAR permite

a aquisição de longos períodos, visando identificar zonas de fragilidade e a evolução dos deslocamentos nos taludes de montante e jusante e no corpo das barragens.

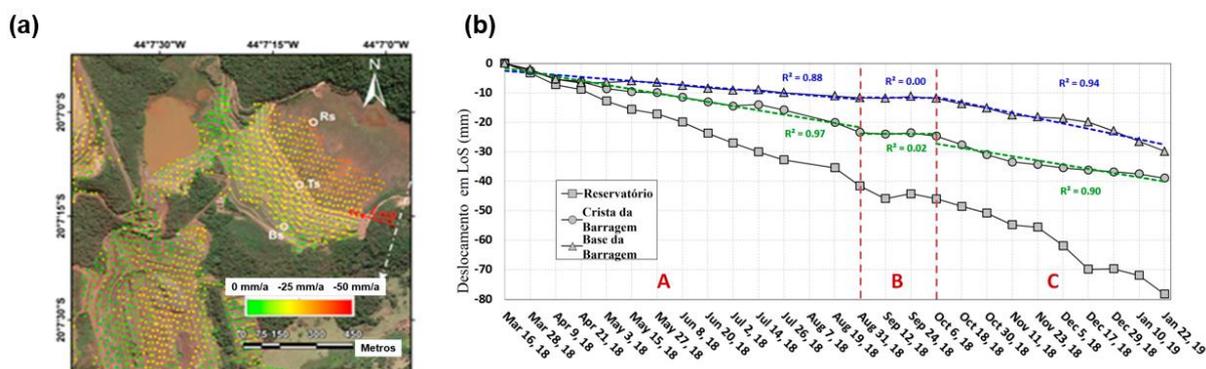
Sobre a temática, e a partir das buscas realizadas nesta pesquisa foram encontrados alguns artigos sobre o desastre em virtude do rompimento da barragem de rejeitos em Brumadinho, Minas Gerais. Os resultados literários que serão explorados em sequência reúnem informações dos autores brasileiros F. Gama *et al.*, (2020), embora existam na lista de artigos elegidos os trabalhos de Du *et al.*, (2020) e Grebby *et al.*, (2021).

No estudo de F. Gama *et al.*, (2020) os autores abordam a análise pré ruptura da barragem de Brumadinho, usando dados DInSAR com base nas técnicas SBAS e PSI. Foram empregadas 26 imagens SLC do Sentinel-1B LOS Descendente, modo IW e polarização VV, entre o período de 16 de março de 2018 a 22 de janeiro de 2019.

Os autores usaram imagens Sentinel-1B para compor a compreensão da evolução dos deslocamentos na barragem, dividindo os resultados a partir da análise das duas técnicas PSI e SBAS. Ao observar o resultado de deslocamento (Figura 59a) com base na técnica SBAS, percebe-se que os maiores valores de deformação foram registrados nos rejeitos (pontos em cores avermelhadas), enquanto os menores valores foram detectados nos setores superior e médio do talude da barragem (pontos em cores amareladas).

Foram selecionados pontos localizados na face do talude, a jusante e dentro dos rejeitos (círculos na cor branca, Figura 59a) a fim de avaliar o comportamento do deslocamento ao longo do tempo. Na Figura 59b é possível perceber um gradiente de deslocamento linear lento desde o início da cobertura até o final de agosto de 2018 (faixa A), seguido por uma fase de relativa estabilidade de agosto de 2018 até o início de outubro de 2018 (faixa B) e um segundo período com um gradiente ligeiramente maior de deslocamento linear nas últimas imagens do Sentinel-1 em 22 de janeiro de 2019 (três dias antes da falha).

Figura 59 – (a) Mapa de deslocamento dados SBAS; (b) Série de deslocamento LOS do SBAS

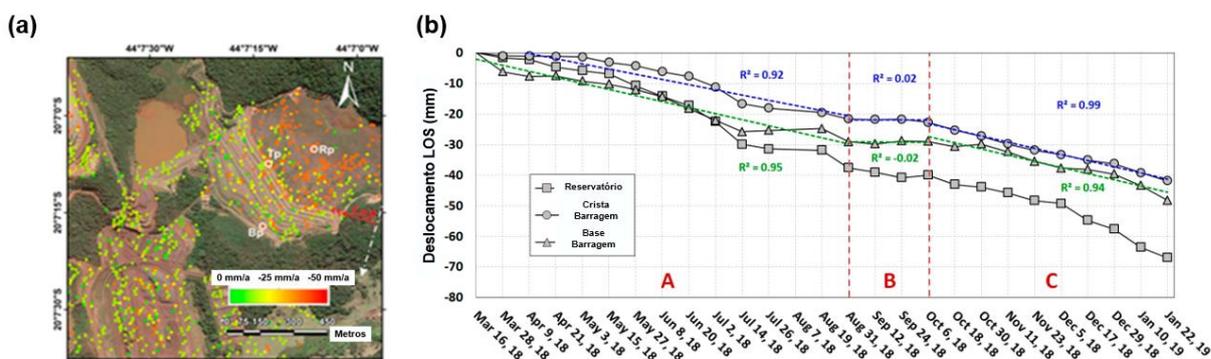


Fonte: Adaptado de F. Gama *et al.*, (2020).

Os resultados com processamento SBAS indicaram um deslocamento máximo acumulado de -39 mm (taxa média de -46 mm/ano) para o topo da barragem, de -31 mm (taxa média de -36 mm/ano) para o fundo da barragem, e média de -79 mm (taxa média = -92 mm/ano) para os rejeitos.

Em relação aos resultados das análises usando a técnica PSI (Figura 60a), observa-se valores máximos de deformações, em torno de -70 mm, detectados na região dos rejeitos (pontos avermelhados). Alguns setores da face da barragem apresentaram pontos com deformações de até -40 mm (pontos alaranjados). Da mesma forma que nas análises SBAS foram identificados pontos posicionados na crista e no talude da barragem. O perfil de deslocamento dos rejeitos é linear, contínuo e o gradiente de aceleração mais intenso quando comparado aos pontos localizados no talude da face. Os deslocamentos cumulativos máximos e taxas médias com processamento PSI para a crista, fundo e rejeitos foram -42 mm (taxa = -53 mm/ano), -48 mm (-50 mm/ano) e -67 mm (-78 mm/ano), respectivamente.

Figura 60 - (a) Mapa de deslocamento dados PSI; (b) Série de deslocamento LOS do PSI

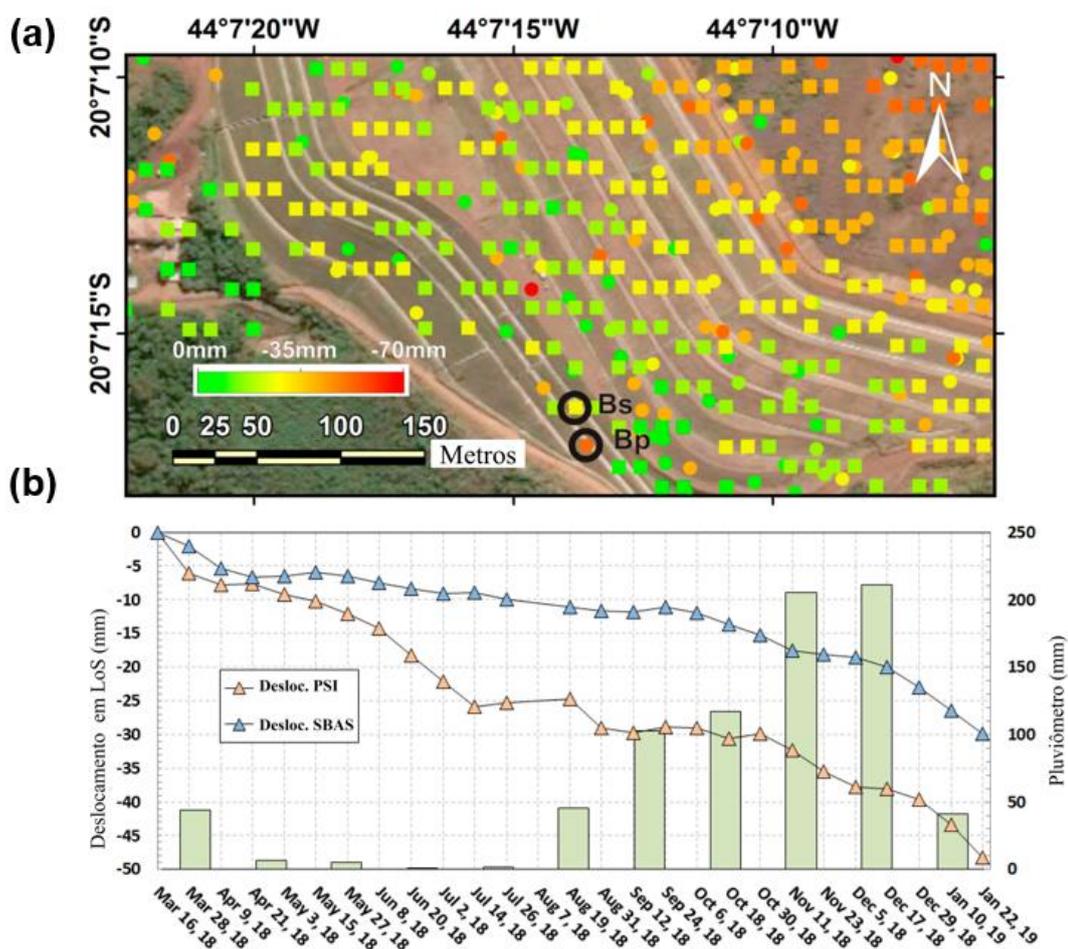


Fonte: Adaptado de F. Gama *et al.*, (2020).

Os autores também relacionaram os resultados de deslocamento PSI e SBAS e definiram dois pontos com os maiores valores de deslocamento no fundo da barragem para análise conjunta com dados de chuva Figura 61a. Na Figura 61b é possível ver os resultados de deslocamento e dados pluviométricos para o período de 03 de março de 2018 a 22 de janeiro de 2019. Segundo os autores, é possível perceber uma clara influência das mudanças na pluviometria favorecendo a aceleração dos movimentos

Em síntese, para os autores os deslocamentos máximos acumulados e as taxas de velocidade foram maiores para PSI do que para SBAS. Os dados de velocidade nos últimos 40 dias antes da falha detectaram variações de deslocamento de 10 mm (SBAS) e 11 mm (PSI). Por fim, a tendência de deformação para os pontos de medição dentro dos rejeitos é caracterizada por um gradiente linear e contínuo de aceleração ao longo do período de monitoramento com ambas as técnicas.

Figura 61 – (a) Resultados SBAS e PSI combinados e as localizações dos pontos Bs e Bp (círculos pretos); (b) éries temporais de deslocamento LoS para os pontos Bs e Bp



Fonte: Adaptado de F. Gama *et al.*, (2020).

5.4.2.2 Estudo da aplicação da InSAR em Barragem de Terra

O monitoramento de longo prazo é de fundamental importância para o entendimento dos recalques em estruturas como as barragens de terra. A compreensão da evolução do deslocamento e a distribuição espacial das deformações no corpo da barragem, auxilia em muito as intervenções *in situ*, bem como presta auxílio ao entendimento de grandes áreas, como é o caso de grandes barragens.

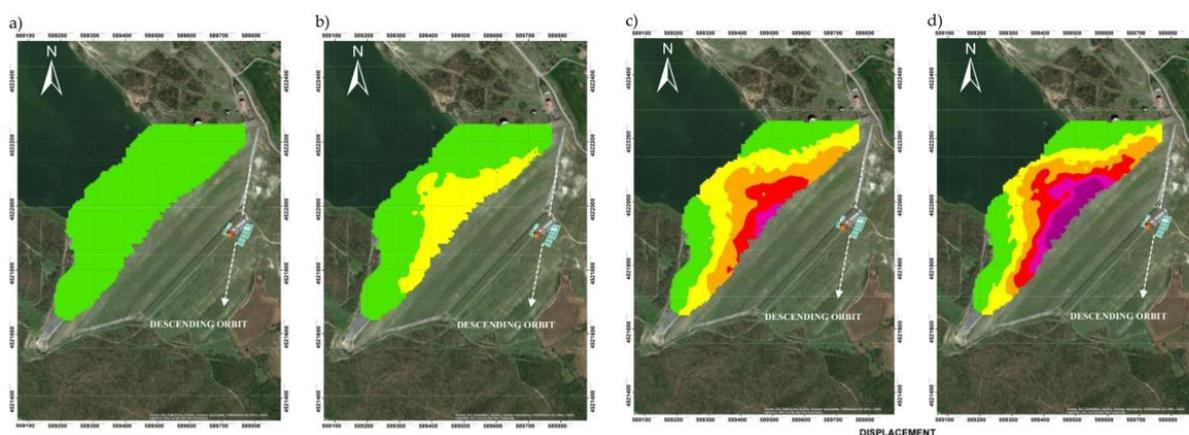
Em uma análise de longo prazo de deslocamentos, usando a InSAR para monitoramento de barragens de terra, os autores Corsetti *et al.*, (2018) realizaram um estudo em que analisaram séries temporais de longo prazo (1992 a 2007). Nas análises foram considerados dados DInSAR de deslocamento e relacionado com informações de equipamentos instalados *in situ*, como extensômetros e medidores de nível de bolha.

A barragem é do tipo zoneada com 88 metros de altura, núcleo de baixa permeabilidade e com ensecadeira de enrocamento. Para o monitoramento DInSAR, aplicou-se a técnica multi-sensor SBAS a um conjunto de dados de 77 cenas ERS-1/2 e ENVISAT, adquiridos de órbitas descendentes entre 1992 e 2007 sobre a área de Murge (sul da Itália), com um tempo de revisita de 35 dias. Também foram consideradas análises de deslocamento a partir de extensômetros instalados no corpo da barragem.

Segundo Corsetti *et al.*, (2018) os deslocamentos (predominantemente associados a componente vertical) atingiram um valor máximo de aproximadamente 240 mm no período 1992-2007 ao longo da crista da barragem, enquanto foram bastante insignificantes no pé da estrutura. Os dados de velocidade registraram valores máximos da ordem de 15,5 mm/ano na crista da barragem.

Na Figura 62 é possível ver resultados da interpolação dos dados de deslocamento e acompanhar a evolução espaço-temporal ao longo do tempo. No primeiro registro dados de deslocamento em 1992 (Figura 62a), 1998 (Figura 62b), 2002 (Figura 62c) e 2007 (Figura 62d). A evolução dos deslocamentos mostra uma concentração de recalques na região da crista da barragem e que segundo os autores é uma evidência que a barragem está cedendo.

Figura 62 - Evolução espaço-temporal da deformação a partir das observações DInSAR



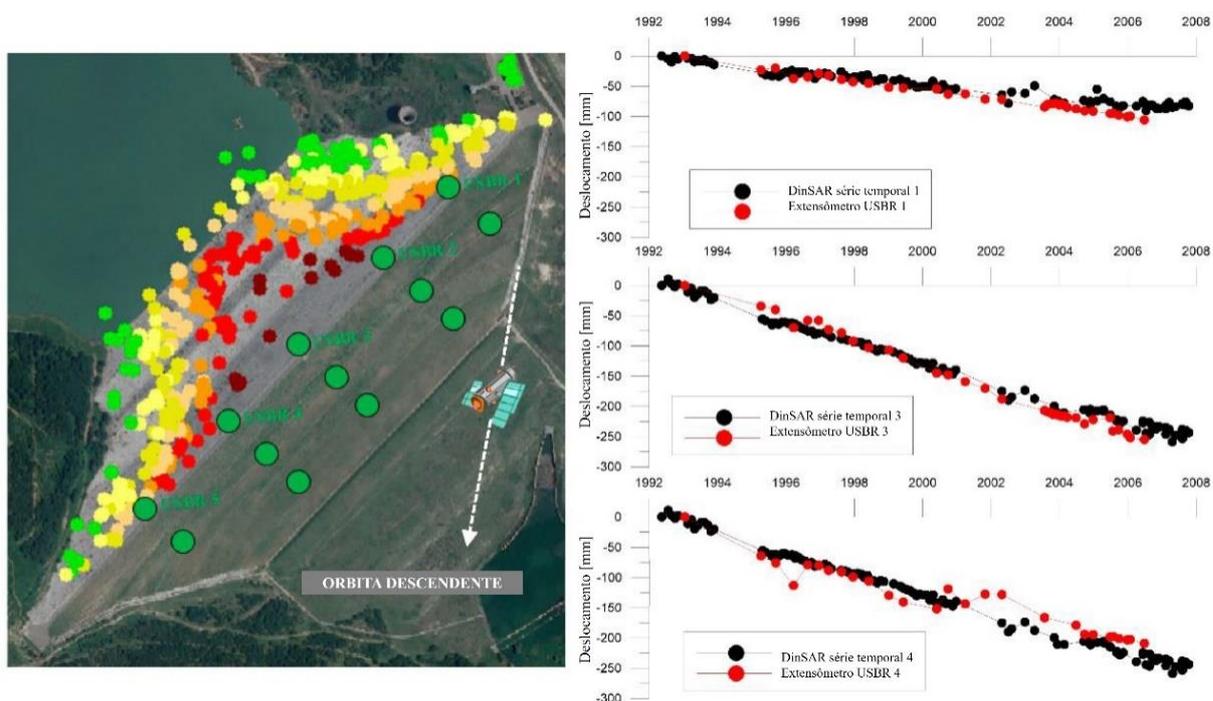
Fonte: Adaptado de Corsetti *et al.*, (2018).

Os resultados de deslocamento de extensômetros instalados na crista da barragem foram comparados com os dados obtidos por meio da abordagem DInSAR. Na Figura 63, é possível ver a localização dos extensômetros (círculos grandes na cor verde) e em destaque três desses instrumentos cujos resultados são comparados com deslocamentos DInSAR na Figura 63. A análise comparativa permite identificar uma boa relação entre as séries, que segundo os autores representa um bom ajuste das linhas de tendências baseados nas medições dos equipamentos instalados *in situ*.

A verificação dos deslocamentos baseados nos medidores de nível bolha evidenciados na Figura 64, mostram uma relação interessante entre a técnica DInSAR e os instrumentos instalados na crista da barragem. Embora o registro das medições só tenha iniciado nos anos 2000 e existirem poucas medições, os autores classificam os resultados como satisfatórios ao relacionar com os dados interferométricos.

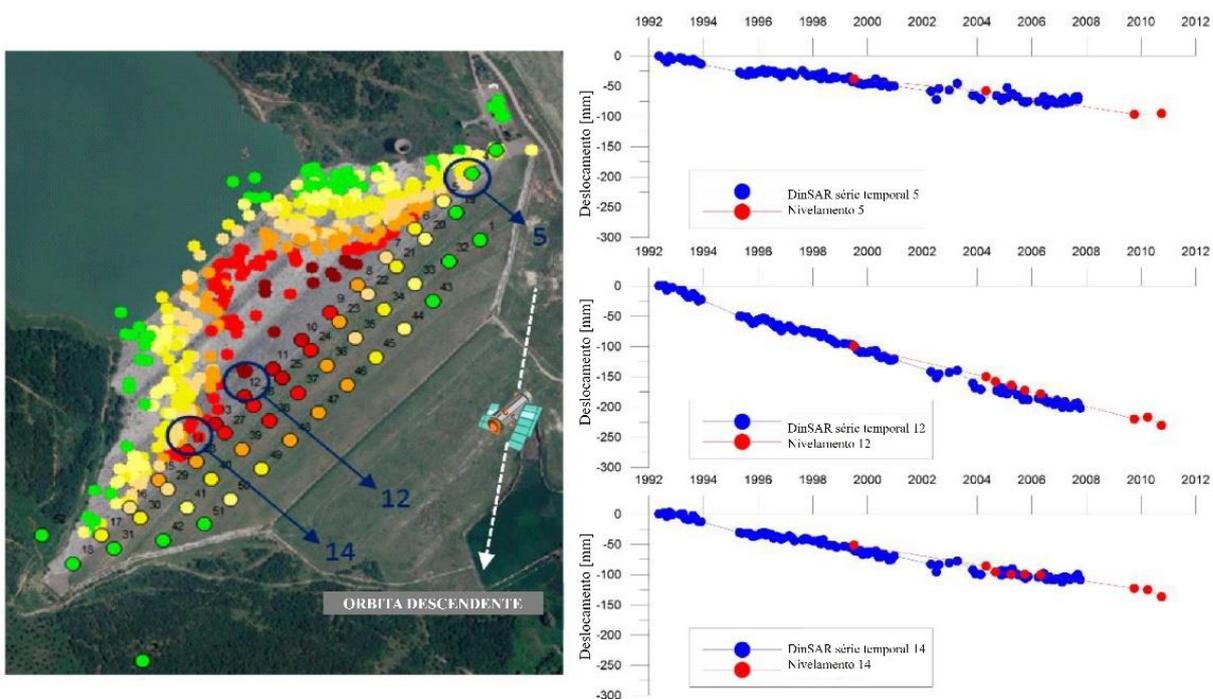
Para Corsetti *et al.*, (2018) a análise dos deslocamentos da série temporal derivada da técnica SBAS-DInSAR reproduziu o comportamento da deformação da barragem, permitindo a realização de uma retroanálise nos períodos em que outros dados de monitoramento não estavam disponíveis. Os autores destacam ainda que séries temporais longas mostram conjunto de dados de calibração valiosos para configurar modelos numéricos com boa confiabilidade. Os dados também serviram para avaliar a precisão das medições de deslocamento derivadas pelo SBAS-DInSAR, com uma comparação com dados *in-situ*, mostrando uma boa concordância.

Figura 63 – Posição e resultados das séries de deslocamento DInSAR e dos Extensômetros



Fonte: Adaptado de Corsetti *et al.*, (2018).

Figura 64 - Posição e resultados das séries de deslocamento dos dispersores DInSAR e dos níveis de bolha



Fonte: Adaptado de Corsetti *et al.*, (2018).

5.4.2.3 Estudo da aplicação da InSAR em Barragem de Concreto

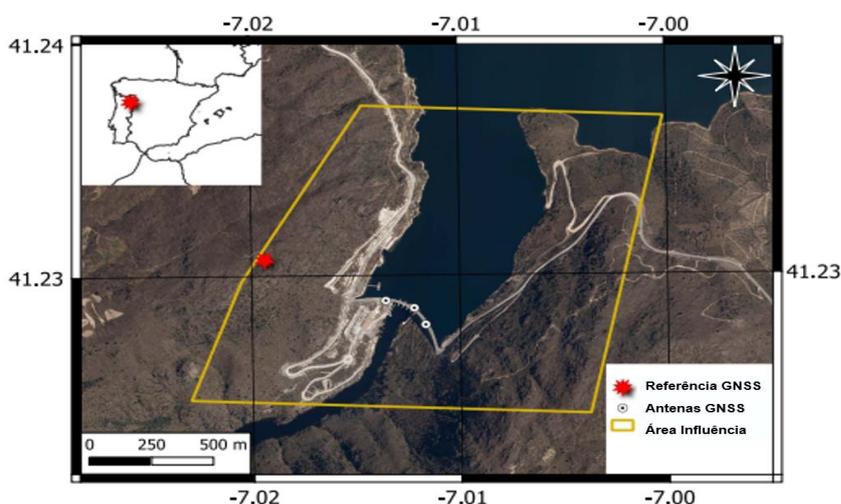
A conexão de dados InSAR e outros equipamentos de medição no monitoramento, tem sido um dos campos de pesquisa de relevante interesse, tendo em vista os benefícios trazidos para a composição de uma rede de monitoramento eficiente.

No estudo de Roque *et al.*, (2021b) os autores discutem uma abordagem metodológica para a integração de medições de deslocamento por interferometria (PSI) e sistema global de navegação por satélite (GNSS). No trabalho, os autores analisaram deslocamentos de uma barragem de concreto, em formato de arco localizada no rio Sabor (afluente do rio Douro) em Portugal, em funcionamento desde 2016, com 123 m de altura acima da fundação e 505 m de comprimento de crista.

No estudo foram usadas imagens SAR em geometria descendente do satélite Sentinel-1A, no modo Interferometric Wide (IW). Ao todo foram empregadas 59 imagens, entre junho de 2016 e maio de 2018. A imagem adquirida em 7 de junho de 2017 foi selecionada como referência porque minimizou as linhas de base perpendiculares e temporais.

Na crista da barragem foram instaladas três antenas GNSS de forma permanentemente (Figura 65). A determinação dos dados de deslocamento do GNSS é feita de forma relativa, em relação a uma quarta antena instalada na margem direita, a cerca de 500 m de distância da estrutura, em local considerado estável e com boa visibilidade para os satélites, sem barreiras de sinal.

Figura 65 – Localização das antenas permanentes GNSS

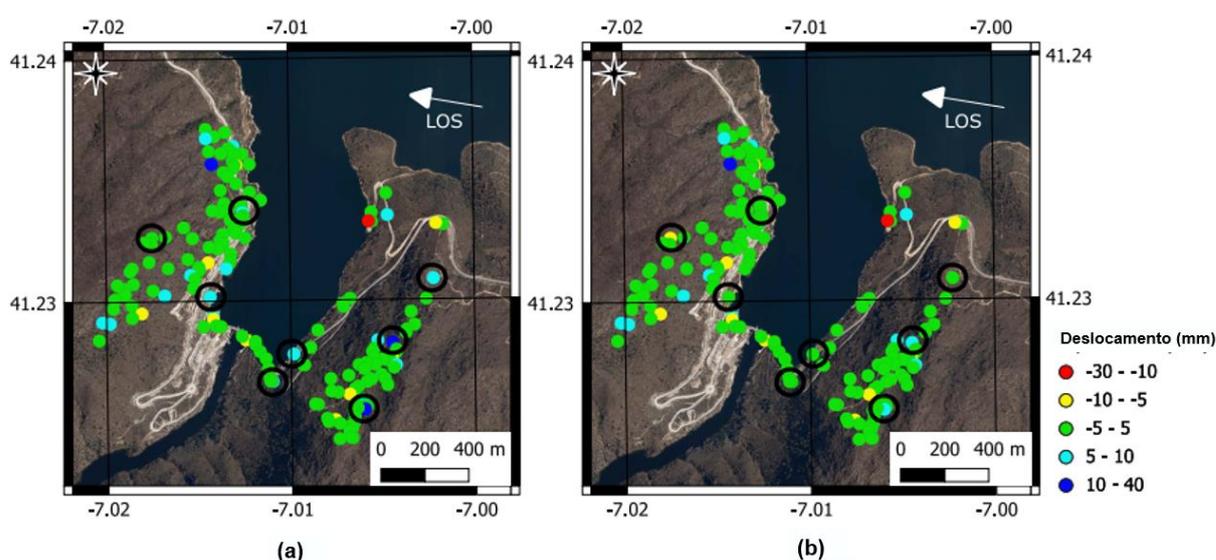


Fonte: Roque *et al.*, (2021b).

Segundo as informações dos autores, dos 174 pontos PS da InSAR na área de estudo, 17 estavam na crista da barragem (Figura 66). As análises realizadas relacionaram as informações de cada ponto das séries PSI, dessa forma, o ajuste da rede permitiu a observação redundante de cada ponto, e as informações permitiram mitigar alguns erros associados ao PSI, como eventual movimento do ponto de referência e resíduos atmosféricos. O deslocamento LOS cumulativo ajustado apresentou mudanças de alguns décimos de milímetros em relação às medidas originais.

A validação do deslocamento foi realizada por meio de um método de igualdade média e variâncias diferentes. Os pontos PSI originais e os deslocamentos ajustados foram comparados com os dados de referência do GNSS. O método proposto permitiu a determinação de deslocamentos ajustados ao longo do LOS na barragem com desvios padrão na faixa de 1,6 a 2,5 mm. O subsistema de monitoramento GNSS instalado na barragem apresentou uma incerteza de 0,4 mm na direção horizontal e 7 mm na direção vertical, o que resultou em uma incerteza de 5,5 mm ao longo do LOS.

Figura 66 - Deslocamento cumulativo LOS: (a) original; e (b) ajustado



Fonte: Roque *et al.*, (2021b).

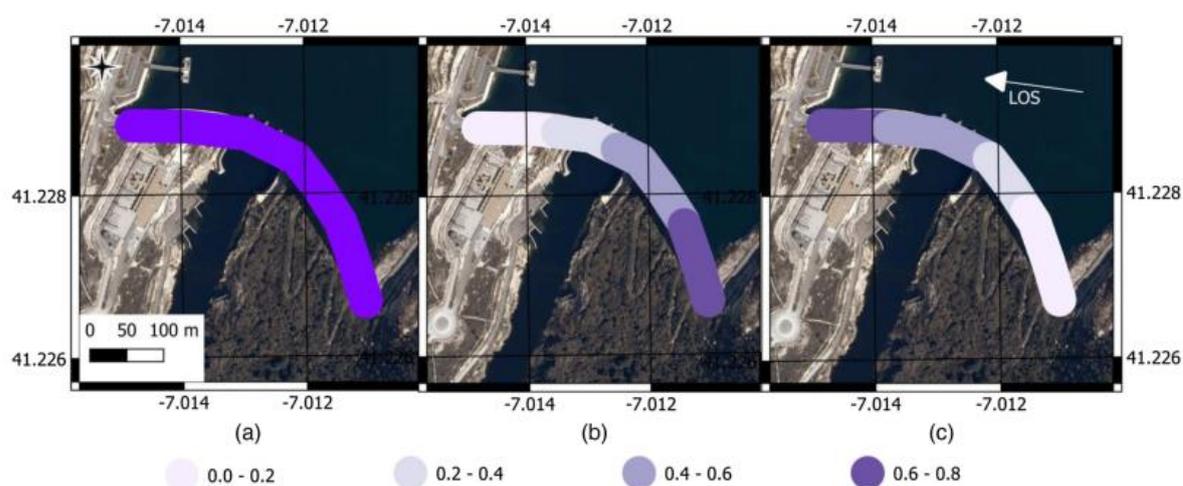
Nas análises propostas por Roque *et al.*, (2021b) a sensibilidade aos deslocamentos verticais dependeu apenas do ângulo de incidência e foi constante para toda a extensão da crista, com valor de 0,8. Isso significa que 1 mm de elevação na barragem foi detectado como 0,8 mm de deslocamento em direção ao sensor

(visão LOS). Da mesma forma, 1 mm de recalque correspondeu a 0,8 mm de afastamento do sensor.

A sensibilidade aos deslocamentos radiais aumentou de zero na margem direita para 0,6 na margem esquerda (Figura 67). Segundo os autores, toda a extensão da crista apresentou valores positivos para sensibilidade, significando que o movimento a montante foi detectado como deslocamento em direção ao sensor e o movimento a jusante correspondeu a deslocamento para longe do sensor. Do centro da barragem para a margem direita, a sensibilidade aos deslocamentos radiais foi baixa. Portanto, se alguma anomalia de comportamento na direção radial tivesse ocorrido naquela área, a geometria SAR utilizada não era capaz de detectá-la.

Para Roque *et al.*, (2021b) a possibilidade de integrar uma rede de pontos PS à antena de referência GNSS e a inclusão de uma observação de dupla diferença GNSS permitiu a mitigação de alguns erros dos dados de deslocamento obtidos pela InSAR e a observação redundante de cada ponto, o que resultou na determinação de deslocamentos LOS ajustados e de variâncias.

Figura 67 - Sensibilidade do LOS a deslocamentos: (a) vertical; (b) radial; e (c) tangencial



Fonte: Roque *et al.*, (2021b).

O tema de barragens tem sido amplamente abordado na literatura técnica, com diversos estudos explorando o uso da InSAR para monitorar e controlar os deslocamentos de superfície. O Quadro 15 destaca trabalhos de relevante contribuição, que discutem novas metodologias de análise de dados InSAR e técnicas avançadas de processamento de imagens SAR

Quadro 15 - Estudos sobre Barragens no mundo usando a InSAR

Estudo	País	Missão	Algoritmo Processamento	Descrição
(JÄNICHEN <i>et al.</i> , 2022)	Alemanha	Sentinel-1A	PSInSAR	Investigação de deformações em barragem de gravidade usando a tecnologia InSAR, resultados comparados com outros meios de monitoramento de barragem
(LIU <i>et al.</i> , 2022)	China	Sentinel-1A	SBAS	Análise de longo prazo de deslizamentos ocorridos em barragens, emprega séries temporais InSAR
(LEE; HONG; KIM, 2021)	Coréia	TerraSAR-X	-	Aplica conceitos da InSAR na medição dos níveis de água e variações em lagos e reservatórios
(MAZZANTI <i>et al.</i> , 2021)	Polonia	Sentinel-1A	A-DInSAR	Análise da evolução de deslocamentos de barragens de rejeitos, análise de recalques e movimentos horizontais
(PAPOUTSIS <i>et al.</i> , 2020)	Grécia	Sentinel-1A	PSInSAR	Análise de grandes quantidades de dados InSAR sobre diferentes áreas do território grego, novas abordagens de processamentos de imagens
(BIONDI <i>et al.</i> , 2020)	China	Cosmo-SkyMed	PSInSAR	Apresentação de proposta de procedimento para monitorar barragens de grandes dimensões
(OTHMAN <i>et al.</i> , 2019)	Iraque	Sentinel1-A	PSInSAR	Análise de deslocamentos obtidos por dados InSAR e comparativo com informações de instrumentação geotécnica tradicional em barragem de terra
(AL-HUSSEINAWI <i>et al.</i> , 2018)	Iraque	Sentinel-1A	SBAS	Análise de dados GNSS e InSAR para monitoramento de deformações em barragem

Fonte: o Autor (2023)

5.5 SÍNTESE DAS APLICAÇÕES

Neste capítulo, foram discutidos estudos de caso de literatura em que foi possível discutir os diversos campos de aplicações da InSAR em áreas de monitoramento de Subsidência, Taludes e Barragens. Inicialmente abordou-se por meio da análise bibliométrica o panorama de publicações que empregam a InSAR como instrumento para monitoramento sobre os temas geotécnicos de estudo, mostrando dentro dos limites desta pesquisa, o nível de produção científica e permitiu explorar publicações com relevância técnica.

A partir da análise bibliométrica verificou-se um predomínio da China, dentre as áreas de aplicações, especialmente, no tema de subsidência. Nos estudos de taludes constatou-se uma forte presença da Itália, com muitos dos autores mais influentes no tema representando institutos italianos. Em relação ao Brasil, destacou-se artigos de autores brasileiros do INPE.

Por meio das publicações analisadas, retrataram a capacidade de observação espaço-temporal da InSAR, que permite observar extensas áreas e o acompanhamento de deslocamentos na superfície. Nos estudos de caso abordados foi possível observar como a InSAR pode ser útil no entendimento da espacialização dos deslocamentos, bem como, auxilia nas intervenções *in situ* para instalação de outros equipamentos de monitoramento, como inclinômetros, medidores de nível e extensômetros.

Além disso, foram destacados nas aplicações a relevância dos pacotes de imagens com escala temporal superior a 2 anos, possibilitando melhor entendimento dos fenômenos desencadeadores dos deslocamentos. Nas aplicações de subsidência foi evidenciada essa importância, tendo em vista que muitos dos fatores de causa estão relacionados a movimentos lentos, naturais ou induzidos. Fato semelhante se verifica na compreensão temporal dos fatores intervenientes na dinâmica dos taludes, em que a evolução temporal assistida pela InSAR pode fornecer melhores diagnósticos sobre ocorrência de rupturas.

Análises temporais de longo prazo são uma das capacidades da InSAR mais exploradas, especialmente com o desenvolvimento de novos algoritmos de processamento. Nas aplicações foram destacadas séries temporais de 15 anos com dados InSAR, além da possibilidade de compor diferentes imagens para obter séries de deslocamentos de longos períodos como visto em Cigna e Tapete, (2021),

Ciampalini *et al.*, (2021), Corsetti *et al.*, (2018). A integração de diferentes imagens, apesar de trazer desafios devido as divergências nas coberturas da imagem, permite ter uma melhor compreensão temporal dos deslocamentos.

Como visto também Cigna; Ramírez e Tapete, (2021), a decomposição a partir da combinação de dados LOS ascendentes e descendentes, permitem a obtenção de dados de deslocamentos verticais e leste-oeste. Essa possibilidade auxilia no monitoramento, uma vez que a compreensão da direção e sentido dos deslocamentos é importante para tomada de decisões e para nortear as intervenções necessárias a manutenção da segurança e mitigação de riscos.

Nesse sentido, foram apresentados casos de aplicações diversas em que os dados InSAR foram combinados com dados de outros instrumentos, dentre eles o GNSS. A associação entre estes equipamentos permite suprir uma deficiência da InSAR que é não ser capaz de mensurar os deslocamentos na direção norte-sul, devido aos mecanismos de imageamento das plataformas. Assim, a combinação do GNSS além de permitir a validação dos dados SAR (ROQUE *et al.*, 2021b) consegue compor os vetores no entendimento tridimensional dos deslocamentos.

A associação de dados InSAR com outras fontes de dados, a partir de diferentes equipamentos sejam de superfície ou em profundidade, como evidenciado podem conferir boas análises entre os dados. Nas aplicações em taludes, a exemplo, cuja dinâmica de movimentações tem relação direta com a chuva, eventos sísmológicos e fatores antrópicos, o nível de detalhamento dos dados é relevante. Assim, os dados InSAR podem ser relacionados com dados climáticos, piezométricos, deslocamento em profundidade, sísmicos, *laser scan* terrestre e/ou aéreo (*vant*); técnicas de imageamento por fotogrametria.

As técnicas de processamento de dados InSAR também foi objeto de discussão entre as aplicações apresentadas. Na literatura existem diversos outros trabalhos que abordam a relação existente entre diferentes técnicas de processamento de imagens. Como visto, as técnicas SBAS e PS-InSAR apresentam diferenças, especialmente, nos casos em que se aplicam séries temporais longas. Nas aplicações foram destacados aspectos positivos e negativos do emprego de uma em relação a outra.

Convém destacar, que nos trabalhos de Intriari *et al.*, (2018), Corsetti *et al.*, (2018) F. Gama *et al.*, (2020), os autores apresentam discussões do método do inverso da velocidade, que embora não tenha sido trazidos as discussões neste trabalho, é uma importante metodologia de análise de ocorrência de rupturas. Em uma

análise mais detalhada e robusta sobre o método do inverso da velocidade, podem ser consultados os trabalhos dos autores Carlà *et al.*, (2019b), Carlà *et al.*, (2018b), Intrieri; Carlà e Gigli, (2019b), Carlà *et al.*, (2017) e Farina, (2020).

6 ASPECTOS RELEVANTES DA TECNOLOGIA INSAR

Neste capítulo são destacados alguns aspectos relevantes sobre o funcionamento e algumas características da InSAR. De início são feitas algumas considerações sobre questões importantes para aquisição e estruturação de dados interferométricos. E destacadas algumas vantagens e limitações da tecnologia, evidenciando como base na discussão apresentada nos demais capítulos suas principais características. Além de serem destacadas algumas perspectivas de aperfeiçoamento e desenvolvimento da ferramenta, especialmente para monitoramento geotécnico.

6.1 RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento tecnológico propiciou uma grande revolução no campo de observações da superfície da Terra, tendo em vista a modernização de diversos componentes, sensores e equipamentos embarcados em satélites e outras plataformas de imageamento. O radar interferométrico de abertura sintética (InSAR) tem sido amplamente empregado em missões cada vez mais modernas e aliado a isso surgem novas técnicas de processamento interferométrico que estimulam novos caminhos e melhorias nos mais variados campos.

Embora a interferometria seja uma ferramenta eficiente e com múltiplas vantagens, como toda e qualquer técnica de monitoramento, requer cuidados necessário ao bom uso, quando de sua implementação. Algumas considerações sobre o uso de dados interferométricos podem ser feitas, especialmente, quando do emprego da InSAR para auxílio em programas de monitoramento, como: definição do tipo de imagem, diferentes tipos de missões e bandas, além da geometria de imageamento e estruturação e processamento dos dados para análise e interpretação dos fenômenos a serem observados.

Para concepção e avaliação de séries temporais de deslocamento é necessário que a quantidade de imagens SAR disponíveis possa ser capaz de representar o alvo imageado sobre a superfície terrestre. Técnicas modernas de processamento, embora consigam extrair ruídos de diferentes naturezas, e consigam explorar as informações de fase de maneira competente, requer que a quantidade de imagens disponíveis seja representativa. Segundo Crosetto *et al.*, (2016) é necessário um número mínimo de

15 a 20 imagens para realizar uma análise MT-InSAR confiável, destacando que quanto maior o número de imagens, mais precisos e robustos são os resultados.

A crescente disponibilidade de dados InSAR e a difusão da técnica como ferramenta capaz de monitorar e observar a superfície, alinhado a um aumento no número de missões SAR ativas, tem permitido avanços importantes. Entretanto, conjuntos de dados SAR de alta resolução disponíveis comercialmente têm um custo associado. Por outro lado, os dados gratuitos do Sentinel-1 da banda C podem ser suficientes para cobrir uma grande área de deformações do solo (RAMIREZ *et al.*, 2022).

Nesse sentido, a escolha do tipo de missão e os produtos de imagem a serem empregados no monitoramento é decisivo para determinados tipos de aplicações. As missões SAR de banda X, como TerraSAR-X/TanDEM-X e COSMO-SkyMed, oferecem uma maior taxa de amostragem temporal, resolução espacial mais elevada e mais pontos PS-InSAR que aqueles baseado na banda C. A alta taxa de amostragem temporal e espacial minimiza o impacto da descorrelação temporal e permite uma melhor recuperação de informações de fase durante o processo de desdobramento da fase (RASPINI *et al.*, 2022b).

Devido ao comprimento de onda mais curto e, portanto, melhor precisão, as construções feitas pelo homem são preferencialmente monitoradas com dados de banda X ou banda C. No entanto, encostas com vegetação ou solo arado podem ser monitorados com banda L, pois os raios do radar de banda L penetram na vegetação inferior para atingir o solo (SOUSA *et al.*, 2015).

Para Meneses; Almeida, (2012) a seleção do comprimento de onda do radar deve ser adequada às características do alvo que se deseja detectar. Por exemplo, a banda X é mais eficiente para identificar variações na textura do solo, enquanto para o mapeamento geológico, por exemplo, onde as feições são de grande escala, a banda L é mais apropriada. Se o objetivo for obter maior penetração nas folhas de uma floresta, uma banda de comprimento maior, como a banda P, é a opção ideal.

Um outro aspecto importante nas informações com base em radares interferométricos, consiste na definição do tipo de geometria a ser empregada. Como a detecção de deslocamentos de superfície pela InSAR ocorre segundo a linha de visão do radar (*Line of sight* – LOS) a topografia do terreno pode representar alguns cuidados em relação ao tipo de consideração da órbita de imageamento. Segundo Ferretti *et al.*, (2007) um terreno muito íngreme pode prejudicar a aplicação do método

DInSAR, obstruindo a visão da fonte ou do sinal. Para identificar esse problema, é aconselhável realizar uma análise topográfica antes do processamento.

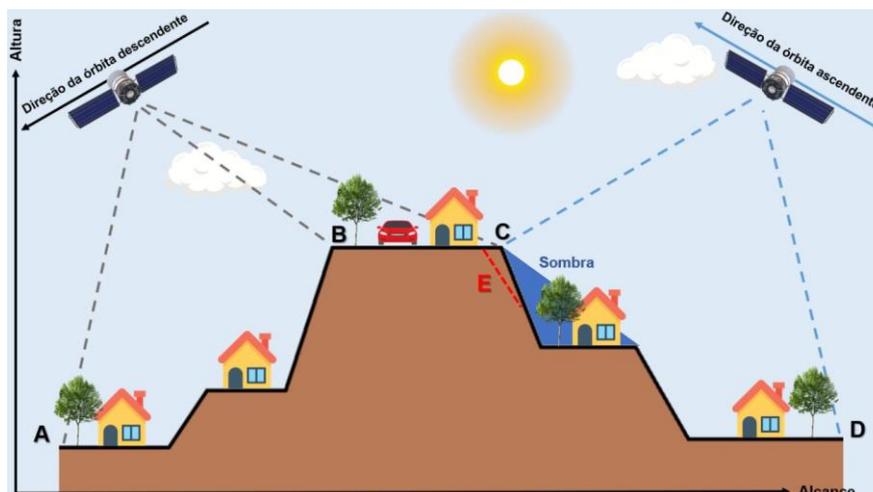
Nos casos em que a região a ser imageado trata-se de área de topografia acidentada (a exemplo de taludes), um fator importante deve ser observado, que é a direção oblíqua do imageamento. A partir do conhecimento sobre como uma imagem SAR é capturada e como os movimentos são calculados, os deslocamentos são mais facilmente detectados quando se movem na direção LOS para perto ou longe do sensor, entretanto, é necessário entender a posição do objeto-alvo a fim de ser possível realizar o imageamento de forma adequada (HÖSER, 2018).

O imageamento de regiões com relevo acidentado incorre em distorções geométricas que são inerentes ao aquisição de imagens SAR provocando encurtamentos de rampa, além dos fatores macrotopográficos, que podem ocasionar sombreamento. Como ilustrado no exemplo da Figura 68, os deslizamentos de terra, ou observações de faces de taludes de barragens com diferentes inclinações, podem apresentar diferenças significativas na identificação a partir dos dados da trilha ascendente. O deslizamento E é bem visível nos resultados da trilha ascendente, mas o deslizamento está em uma área sombreada dos dados da trilha descendente e não podem ser identificados de forma efetiva.

Paradella; Mura; Gama, (2021) salienta ainda que para corrigir aspectos relacionados a distorções geométricas, podem ser empregados fatores de correção como a ortoretificação por meio de modelos digitais de elevação (MDE). Além disso, a possibilidade de imageamento segundo duas geometrias diferentes e complementares de direção de visada, contribuem para reduzir esses efeitos indesejáveis nas imagens.

A partir dessas considerações, Liang *et al.*, (2022), também ressalta que ao realizar investigações de deslizamentos, é recomendável usar os dados de órbita ascendente e descendente para realização do imageamento. Dessa forma, é possível a aquisições com azimutes de visadas opostas, permitindo reduzir os efeitos deletérios do encurtamento de rampa e o sombreamento causado pelas variações da geometria de iluminação.

Figura 68 – Representação esquemática de identificação de deslizamento segundo órbitas ascendentes e descendentes



Fonte: Adaptado de Liang *et al.*, (2022)

Além disso, dados interferométricos carregam um volume de informações muito grande e requerem a concepção de uma estrutura física e digital capaz de armazenar, processar, integrar e analisar informações. Os autores Cigna; Tapete, (2021) destacam dois fatores sobre a estruturação de dados InSAR, o primeiro relacionado a combinações eficientes de infraestrutura computacional, envolvendo algoritmos e *softwares* capazes de executar e otimizar grandes fluxos de informações para processamento de dados SAR. O segundo fator relaciona-se as ferramentas necessárias para analisar os dados de saídas a partir do processamento, uma vez que aos dados carregam informação de centenas de milhares de alvos, contendo geolocalização, qualidade, velocidade de deslocamento e registros de deformação, diretamente relacionados com o número de imagens SAR processadas.

Para Höser (2018), além de softwares complexos, podem surgir outras restrições, como de hardware, tendo em vista que as séries temporais mais longas, superior a dois anos, requerem cada vez mais que o processamento se dê em ambiente computacional de alto desempenho. Análises de séries temporais de técnicas de processamento mais modernas, como SBAS e PSInSAR fornecem um número muito grande informações e permitem análise de pilhas de imagens elevadas, dessa forma, é necessário compor um sistema de processamento mais robusto.

A análise e interpretação de dados interferométricos, tem como finalidade principal, o entendimento dos efeitos das movimentações do alvo imageado. Nesse sentido, a observância da precisão dos dados adquiridos representa a grandeza principal das informações disponíveis. Em programas de monitoramento, a

observância do comportamento dos dados é fundamental para qualidade dos diagnósticos, bem como a confiança nos resultados aferidos pelos equipamentos.

Os deslocamentos aferidos pela InSAR dependem em muito do processamento das imagens. As variáveis consideradas durante o processamento, dentre elas os ruídos presentes, efeitos atmosféricos indesejáveis, distorções angulares, defeitos do sensor e interferências, representam um fator decisivo para o resultado dos interferogramas. Outro aspecto relevante para essa discussão, consiste na avaliação do usuário ao definir as técnicas de processamento a serem empregadas, os tipos de algoritmos a serem empregados e as variáveis consideradas na cadeia de processamento (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Devido a isso, é importante um direcionamento eficiente nas etapas de processamento das imagens, avaliando de maneira correta os aspectos intervenientes na aquisição das imagens. Além disso, a experiência do operador e a qualidade dos meios empregados para processar as imagens são fatores determinantes para a qualidade e confiança dos resultados adquiridos. A escolha de softwares capazes de extrair as informações de modo inteligível, bem como os meios físicos necessários para esse tipo de atividade, configuram a etapa mais importante da análise de dados InSAR.

Baseado nessas características é comum, principalmente, em programas de monitoramento, a associação de dados interferométricos com outros equipamentos, visando a integração das informações e a validação dos dados pela InSAR. Equipamentos de natureza pontual e/ou instalados in loco, tendem a apresentar certa confiabilidade, devido o contato direto com o objeto monitorado, permitindo um acompanhamento mais confiável a partir da relação com os resultados interferométricos (CARLÀ *et al.*, 2018a).

6.2 VANTAGENS

Para Lin, (2022), umas das principais vantagens da InSAR pode ser a cobertura de grandes áreas, aquisição regular de imagens, ou seja, alta resolução temporal e monitoramento a longo prazo. A capacidade de uma só imagem radar possibilitar obter uma cobertura de grandes dimensões (250 km por 250 km, no caso do satélite Sentinel-1A/B, da Agência Espacial Europeia), operando sob quaisquer condições

atmosféricas, sem a necessidade da luz solar e permitindo observar a maioria das estruturas visíveis nessa imagem, representa uma grande vantagem para programas de monitoramento, além da capacidade de obter grande densidade de pontos interferométricos (PATRICIO, 2018).

Além disso, Souza (2022) destaca a habilidade do InSAR de medir deslocamentos passados, através de imagens SAR históricas, permitindo a realização de estudos das variações superficiais que podem não estar disponíveis através de outras fontes de dados. Com a implementação de dados MT-InSAR e técnicas de processamento mais eficientes como SBAS e PS-InSAR, tem sido possível séries temporais mais longas, permitindo análises de longo prazo, fornecendo um número maior de informações.

A capacidade espaço-temporal dos dados InSAR tem um campo de observação maior, o que permite melhor interpretação dos deslocamentos e as áreas com elevados níveis de criticidade. Dessa forma, a partir das observações por meio da InSAR, é possível auxiliar na implantação de outros instrumentos, definindo melhor suas posições e colaborando para melhorias no acompanhamento do comportamento da região a ser estudada (INTRIERI; GIGLI, 2016).

Aliado a essa característica, a análise diagnóstica obtida por meio das observáveis espaciais de dados InSAR e das informações de outros instrumentos de natureza pontual, faz com que seja mais assertiva. Como a composição de um programa de monitoramento, por princípio, conjuga diferentes informações como dados pluviométricos, deslocamentos de superfície e subsuperfície, a possibilidade de integração dessas informações, permite ganhos expressivos na compreensão da evolução e dos mecanismos de ação do objeto de estudo.

Como já discutido, o deslocamento do solo é medido na linha de visão do satélite, assim as informações estarão sob a direção de imageamento LOS ascendente e descendente. No entanto, a decomposição de dados LOS nas componentes vertical e horizontal, representa um ganho significativo para as análises, pois permite uma compreensão mais robusta, permitindo associação com outras informações, garantindo uma observação 2D, com melhor compreensão situacional da abordagem de estudo (MCCORMACK; THOMAS; SOLOMON, 2011).

Novas técnicas de processamento, tem permitido melhores precisões dos dados InSAR. Du *et al.*, (2022) destacam que a precisão do monitoramento de deslocamentos de novas tecnologias como SBAS provou ser precisa no nível

centimétrico, ou mesmo no nível milimétrico. Técnicas A-DInSAR como PSInSAR e SBAS são usadas para monitorar a deformação da superfície com precisão de centímetros ou sub-centímetros ao utilizar sensores na banda C e X, e precisão de alguns centímetros com sensores na banda L (GAMA *et al.*, 2013).

6.3 LIMITAÇÕES

Devido as características de operação da tecnologia InSAR, algumas limitações são próprias desse sistema, umas podem ser corrigidas por meio de processamento, embora outras representem desafios ao emprego da técnica devido às características do sensor e modo de operação. A discussão dos fatores limitantes da interferometria SAR ressalta alguns aspectos substanciais para melhorias de seu emprego, especialmente, para o desenvolvimento de novas tecnologias, sensores, e meios de processamento de imagens.

O método de funcionamento de plataformas orbitais onde estão embarcados os radares de aquisição das imagens, operam segundo órbitas predefinidas, dessa forma cada missão satélite tem um tempo de revisita distinto. Esse tempo gasto pelo satélite para voltar a imagear determinado alvo sobre a superfície terrestre representa a frequência de atualização da série temporal e novas medições da área de interesse.

Em virtude desse tempo, que apesar de variar de acordo com a missão, usualmente tem um período de 6 a 12 dias, representa intervalos consideráveis para acompanhamentos de áreas sensíveis, como taludes instáveis, barragens e ambientes de mineração. Dessa forma, a limitação do tempo de revisita representa um aspecto negativo, impossibilitando o acompanhamento em tempo real e a composição de sistemas de alertas baseados apenas nos dados InSAR.

Para Moretto; Bozzano; Mazzanti, (2021), tempos de revisita muito longos dificultam a observação de processos acelerados. A distância máxima estimada também depende da frequência de revisita. Quanto maior a frequência de amostragem, maior a precisão das previsões. Além disso, monitorar processos de deslizamento com técnicas avançadas (alta resolução espacial e temporal), pode tornar os métodos de previsão de ruptura com base em dados InSAR, úteis em estratégias de gerenciamento de risco e para alertas precoces.

O processamento de imagens SAR é o procedimento empregado para extrair as informações contidas nos interferogramas e poder dispor dos dados de deslocamento

usados nas interpretações da área de interesse. Nesse sentido, o tempo demandado para processar as imagens e a disponibilidade das informações impacta diretamente a capacidade observacional dos fenômenos de estudo em um programa de monitoramento.

Segundo Höser, (2018), após a aquisição de uma nova imagem realizada pelo radar, realiza-se um novo fluxo de trabalho, tendo como finalidade a produção de uma nova série temporal de deslocamentos, mais precisa. No entanto, embora a imagem possa estar disponível na mesma data de registro, as informações como arquivo de órbita, as posições precisas e informações adicionais, podem não ser fornecidos, necessitando de um período superior, que pode ocorrer até três semanas após a data de detecção.

Um outro fator importante, diz respeito aos aspectos relacionados a operação dos satélites, como as órbitas têm uma natureza polarizada, possível captar imagens do solo a partir das direções leste ou oeste, registrando deformação que ocorra nestas direções. No entanto, deformações do solo orientadas norte-sul não causam variação na direção ou distância em relação ao satélite, e, portanto, o InSAR não é capaz de detectá-las (MCCORMACK; THOMAS; SOLOMON, 2011).

Essa deficiência faz com que o emprego da InSAR em programas de monitoramento, necessite de dados de outros equipamentos, a exemplo o GNSS. Como já abordado em capítulos anteriores deste trabalho, o emprego do GNSS auxilia no entendimento dos deslocamentos nas três direções e permite validar informações da InSAR, sendo capaz de compor a direção resultante de vetores de deslocamento.

Fatores associados a aquisição das imagens são a descorrelação temporal e geométrica, que segundo Negrão (2017) representam as maiores limitações para a InSAR. A descorrelação temporal tem grande impacto nas medidas interferométricas em áreas de vegetação ou em áreas compostas por alvos cujas propriedades elétricas, ou ainda que suas posições se alteram com o tempo. Além disso, as variações na refletividade devido ao ângulo de incidência (descorrelação geométrica) restringem ainda mais a quantidade de pares adequados para uso interferométrico. Isso resulta em perda de coerência e precisão dos resultados (ANTUNES, 2015).

A medida que a linha de base temporal do interferograma aumenta (intervalo de tempo entre as duas aquisições SAR), o impacto dos fenômenos de descorrelação temporal aumenta. Além da descorrelação de fase, os efeitos de propagação na troposfera e ionosfera podem variar significativamente entre a primeira e a segunda

aquisição, resultando em perturbações de fase que dificultam a geração do interferograma (GAMA *et al.*, 2013).

6.4 TENDÊNCIAS

O emprego da InSAR para fins geotécnicos tem se notabilizado nos últimos anos, com a tecnologia sendo cada vez mais difundida. As vantagens já destacadas, propiciam ganhos expressivos para tarefas de monitoramento e acompanhamento de obras e regiões com vistas a redução de riscos. O investimento de novas tecnologias e melhorias de sistemas de processamento vem permitindo mitigar as limitações da InSAR, tornando seu uso cada vez mais robusto e permissivo.

Para Liu *et al.*, (2022) as pesquisas em InSAR atualmente, visam o desenvolvimento de cadeias de processamento que possam atualizar continuamente as saídas de multi-interferogramas, bem como sua análise automatizada, sempre que novas imagens SAR estiverem disponíveis. Nesse sentido, essas ferramentas podem ser úteis para análise do comportamento de tendências e acelerações anômalas de deslocamentos incipientes, permitindo melhor assertividade na emissão de alertas e servindo para o monitoramento operacional. Para tanto, é necessário a otimização do processamento e o tempo necessário para reprocessar dados multi-interferogramas em algumas horas.

Nessa perspectiva Intrieri *et al.*, (2018) comentam que a aplicação de algoritmos automáticos para a detecção de mudanças de tendência em séries temporais de deslocamento pode fornecer uma contribuição única para a identificação precoce de qualquer tendência anômala e/ou aceleração. Com isso, a utilização da detecção automatizada de anomalias de tendência em nível regional pode oferecer uma ferramenta valiosa para um sistema de alerta preliminar e aprimorar consideravelmente o tempo de percepção dos fenômenos associados a perigos.

Sob a perspectiva de melhores condições de processamento e novas ferramentas que aumentem a agilidade da disponibilidade dos dados Aslan *et al.*, (2020) destacam o uso de técnicas já disponíveis como PSI e SBAS para detectar deslocamentos lentos a moderados. No entanto, os autores sugerem um novo método de rastreamento de deslocamento sub-pixel para detectar movimentos mais rápidos, como é o caso dos deslizamentos de terra.

Um outro aspecto a ser bastante difundido com o emprego da tecnologia InSAR é o uso combinado de equipamentos, permitindo uma relação com dados de diferentes natureza, porém que propiciem uma integração das informações. A análise integrada de informações com diferentes espectros, é um fator importante para eficientes programas de monitoramento. As melhores das capacidades da InSAR e o aperfeiçoamento da capacidade de resolução espaço-temporal permitirão melhor integração e análise conjunta de dados de deslocamento, climáticos, sismológicos e tantos outros.

Para efetiva melhoria e correção das limitações quanto a resolução temporal das aquisições da InSAR, tem sido implementado novas tecnologias de aquisição e a tentativa de lançamento de novas missões, dotadas de sensores mais modernos. O GB-InSAR permite monitorar áreas em tempo real em vez de pontos únicos, aumentando os limites do que é considerado monitoramento em tempo real. Além disso, o GB-InSAR pode medir em uma ampla área de cobertura (WEI; WENKAI, 2021).

A interferometria de radar de abertura sintética baseada no solo (GB-InSAR) poderá ser ainda mais explorada, permitindo contornar a deficiência temporal das aquisições da InSAR por meio de satélites. Com a possibilidade de aquisições em escalas de minutos essa tecnologia pode ser empregada no monitoramento de vários tipos de perigos naturais, como como vulcões, deslizamentos de terra, queda de rochas e geleiras. O aplicativo GB-InSAR também pode ser estendido para estruturas, como infraestruturas portuárias, barragens e pontes, fornecendo uma base para análise de segurança estrutural (WANG; XING; PAN, 2020).

Atualmente, as tendências de pesquisa em InSAR estão focadas no desenvolvimento de cadeias de processamento e abordagens que possam atualizar continuamente as saídas de processamento de multi-interferogramas, além do seu pós-processamento e análise automatizada, sempre que novas cenas SAR estiverem disponíveis para a área de estudo. Essas abordagens têm o potencial de fornecer informações cruciais para o monitoramento e alerta precoce de tendências anômalas e acelerações associadas a precursores ou processos de deformação incipiente, e, assim, podem ser utilizadas para alertas de entrada e serviços de monitoramento operacional (MONSERRAT; CROSETTO; LUZI, 2014).

6.5 SÍNTESE DAS DISCUSSÕES

Na sequência é apresentado o Quadro 16 com uma síntese das discussões apresentadas neste capítulo. A concepção dessas informações foi possível a partir das referências consultadas e das contribuições dos autores reunidas neste tópico em discussão. A finalidade do quadro é apresentar de forma clara e objetiva, considerações relevantes sobre os aspectos mais relevantes da interferometria, especialmente relacionada ao monitoramento geotécnico.

Quadro 16 – Aspectos relevantes sobre a tecnologia InSAR

(continua)

Cuidados	<ul style="list-style-type: none"> • Escolha da geometria: A geometria SAR utilizada pode afetar a precisão da interferência, e o cuidado deve ser tomado na escolha da geometria mais adequada para a aplicação. • Análise temporal: Para uma análise assertiva dos dados InSAR é necessário um número razoável de imagens, permitindo melhor compreensão temporal. • Qualidade dos dados: A qualidade dos dados SAR é crucial para o sucesso da interferometria, e problemas como ruído e problemas de processamento podem afetar a precisão da interferência. • Estruturação dos dados: Implantação de uma infraestrutura capaz de armazenar, processar e analisar os dados. • Validação e interpretação dos resultados: É importante validar e interpretar corretamente os resultados da interferometria SAR, e compará-los com outras fontes de dados, se possível.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Não requer acesso físico à superfície. • Não requer luz solar direta ou claridade, tornando possível a observação em todas as condições meteorológicas. • Capacidade de medir deformações superficiais com alta precisão. • Permite mapeamento de grandes áreas de forma eficiente. • Pode ser combinado com outras fontes de dados para ampliar a informação obtida. • Permite o monitoramento a longo prazo de fenômenos dinâmicos. • Oferece resolução espacial e temporal comparável a outros métodos de sensoriamento remoto. • Possibilita o uso de dados históricos para estudar mudanças passadas.
Limitações	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de revisita: para algumas aplicações o tempo de revisita pode interferir na agilidade de observações da superfície. • Sensibilidade limitada a movimentos em direções específicas: o uso de satélites SAR tem a limitação de que a linha de visão (LOS) só capta imagens do solo que podem ser decompostas em direções vertical e leste-oeste (imagens ascendentes e descendentes no mesmo período), o que significa que movimentos em direções norte-sul podem ser insensíveis. • Descorrelação temporal: a mudança na vegetação e na superfície do solo pode afetar a correlação entre as imagens SAR, limitando a precisão dos resultados de InSAR. • Requer múltiplos dados SAR: a InSAR requer pelo menos duas imagens SAR para criar uma interferograma, e quanto mais imagens disponíveis, mais preciso será o resultado (o ideal são conjuntos a partir de 20 de imagens). • Influência de fatores externos: fatores como atmosfera, movimentos do satélite podem afetar a precisão dos resultados InSAR. • Complexidade do processamento: o processamento InSAR é complexo e pode requerer muito tempo e recursos computacionais.

Quadro 16 - Aspectos relevantes sobre a tecnologia InSAR

(conclusão)

Tendências	<ul style="list-style-type: none">• Aumento da resolução: Com a disponibilidade de novos satélites SAR de alta resolução, a precisão e a resolução das imagens InSAR estão aumentando, permitindo a monitoração mais detalhada da deformação do solo.• Processamento de dados em larga escala: A evolução do processamento de dados em larga escala está permitindo o tratamento de enormes quantidades de dados InSAR em tempo hábil, o que é importante para aplicações operacionais.• Aplicações ampliadas: Além de sua aplicação tradicional na monitoração de desastres naturais e da infraestrutura, a InSAR está sendo usada para estudar vários outros fenômenos, incluindo mudanças climáticas, monitoramento de água subterrânea e estudos geológicos.• Radares de solo: Ampliação do uso e potencialidades da tecnologia GB-InSAR, com intervalos de aquisições da ordem de minutos.
------------	--

Fonte: Autor (2023)

7 CONCLUSÕES

A discussão apresentada neste estudo evidenciou uma série de conceitos e características da Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR), bem como o estado da literatura sobre o tema dentro das perspectivas da metodologia empregado no estudo. A revisão sistemática e o estudo bibliométrico trouxeram luz uma perspectiva das publicações científicas de período recente, destacando as principais instituições, autores e países que empregam a tecnologia InSAR para programas de monitoramento geotécnico. Nesse aspecto, a pesquisa evidenciou poucos trabalhos nacionais nos temas explorados, indicando uma necessidade de implementação não só dessa tecnologia como de outras similares.

Os estudos de caso abordados, bem como a sistematização das ideias propostas, puderam destacar a aplicabilidade da técnica para o monitoramento geotécnico, elegendo casos de diferentes naturezas, com diferentes abordagens e possibilitando uma amplitude de aplicações nos temas de subsidência, taludes e barragens. O panorama de aplicações discutidos permitiu ampliar os conhecimentos sobre a temática, destacando diferentes perspectivas das análises de dados interferométricos e o estado atual das capacidades dos equipamentos, técnicas de processamento e algumas tendências a serem implementadas, melhorando a capacidade da InSAR nas observações sobre a superfície terrestre.

A sistematização de ideias, conceitos literários e informações técnicas por meio das aplicações, contribuíram para o melhor entendimento da tecnologia, bem como auxiliam novos pesquisadores no entendimento da abordagem. A organização das informações de forma síntese e a elegibilidade de alguns cuidados, vantagens e limitações da técnica, contribuem para o entendimento e difusão da tecnologia tanto no ambiente acadêmico quanto profissional.

Embora a pesquisa tenha buscado organizar de forma mais ampla os conceitos e características da InSAR, se trata de uma tecnologia em constante evolução com muitos pesquisados e empresas realizando estudos e investimentos em novas técnicas de processamento e sensores. Dessa forma, o trabalho não se propôs abordar aspectos específicos do processamento de imagens, bem como não assistiu a aplicações diretas com dados interferométricos, necessitando assim que características específicas de análises, etapas de processamento e avaliação dos dados, sejam mais bem definidas em aplicações diretas.

De modo a contribuir com pesquisas futuras, sugere-se que novos estudos possam abordar:

- Análise das técnicas de processamento, fornecendo informações mais detalhadas de cada método, bem como o auxílio a implantação de programas de monitoramento geotécnico.
- Análise da integração de dados interferométricos com outros instrumentos a fim de avaliar melhor a precisão e validação dos resultados da InSAR.
- Abordagem sobre a tecnologia de Radar Interferométrico Baseado em Solo (GB-InSAR), discutindo suas características e abordagem de aplicação.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, A.; WIGAND, R. T.; HOSSAIN, L. Measuring social capital through network analysis and its influence on individual performance. **Library & Information Science Research**, v. 36, n. 1, p. 66–73, jan. 2014.
- AHMAD, W.; KIM, D. Estimation of flow in various sizes of streams using the Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) data in Han River Basin, Korea. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 83, 101930, 2019.
- AL-HUSSEINAWI, Y. *et al.* Evaluation of the Stability of the Darbandikhan Dam after the 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran–Iraq Border) Earthquake. **Remote Sensing**, v. 10, n. 9, p. 1426, 7 set. 2018.
- ANTUNES, D. P. G. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para extração da altura de edifícios e de infraestruturas com recurso a imagens SAR**. Dissertação mestrado, p. 1–69, 2015.
- ARAÚJO, C. A. **Bibliometria: evolução histórica e questões atuais**. [s.l.: s.n.].
- ASLAN, G. *et al.* Landslide Mapping and Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique in the French Alps. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, p. 1305, 20 abr. 2020.
- ASWATHI, J. *et al.* InSAR as a tool for monitoring hydropower projects: A review. **Energy Geoscience**, Vol. 3 No. 2, 160-171., 2022.
- ATZENI, C.; BARLA, M.; PIERACCINI, M.; ANTOLINI, F.. Early Warning Monitoring of Natural and Engineered Slopes with Ground-Based Synthetic-Aperture Radar. **Rock Mechanics and Rock Engineering**. v.48. p.235-246., 2015.
DOI:10.1007/s00603-014-0554-4
- BAMLER, R.; HARTL, P. Synthetic aperture radar interferometry. **Inverse Problems**, v. 14, n. 4, p. R1-R54, 1998. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.
- BAO, X. *et al.* Ground Deformation Pattern Analysis and Evolution Prediction of Shanghai Pudong International Airport Based on PSI Long Time Series Observations. **Remote Sensing**, v. 14, n. 3, 1 fev. 2022.
- Basili, R.; Barba, S.; Burrato, P.; Fracassi, U.; Kastelic, V.; Tiberti, M.M.; Vannoli, P.; Stramondo, S.; Tolomei, C.; Soligo, M.; *et al.* Project S1: Analysis of the Seismic Potential in Italy for the Evaluation of the Seismic Hazard. Deliverable # 3.01.1 Technical Report Illustrating the Results Obtained in the Crotona Peninsula Based on Geological and InSAR Data; INGV: Rome, Italy, 2010
- BASSOI, L. H. *et al.* Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. 2014.
- BEDINI, E. OPEN JOURNAL SYSTEMS Persistent Scatterer Interferometry of Sentinel-1 time series to detect ground subsidence in the city of Recife, Brazil *Journal*

of Hyperspectral **Remote Sensing** v. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.periodicos.ufpe.br/revistas/jhrswww.ufpe.br/jhrs>.

BELL, J.W.; AMELUNG, F.; FERRETTI, A.; BIANCHI, M.; NOVALI, F. Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge. **Water Resour. Res.** 44 (2). 2008.

BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 11, p. 2375-2383, 2002. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.

BIESCAS, E.; CROSETTO, M.; AGUDO, M.; MONSERRAT, O.; CRIPPA, B. Two radar interferometric approaches to monitor slow and fast land deformation. **J. Surv. Eng.** 133 (2), 66–71. 2007.

BIONDI, F. *et al.* Monitoring of Critical Infrastructures by Micromotion Estimation: The Mosul Dam Destabilization. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 6337–6351, 2020.

BOVENGA, F.; WASOWSKI, J.; NITTI, D.O.; NUTRICATO, R.; CHIARADIA, M.T. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. **Remote Sens. Environ.** 119, 272–285. 2012.

BÜRGMANN, R.; HILLEY, G.; FERRETTI, A.; NOVALI, F. Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. **Geology** 34 (3), 221–224. 2006.

CARLÀ, T. *et al.* Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment. **Geomorphology**, v. 335, p. 62–75, jun. 2019a.

CARLÀ, T. *et al.* Displacement of a landslide retaining wall and application of an enhanced failure forecasting approach. **Landslides**, v. 15, n. 3, p. 489–505, 1 mar. 2018b.

CARLÀ, T. *et al.* Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses. **Landslides**, v. 14, n. 2, p. 517–534, 1 abr. 2017.

CARLÀ, T. *et al.* Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. **Engineering Geology**, v. 235, p. 39–52, mar. 2018a.

CARLÀ, T. *et al.* Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019b.

CASCINI, L.; FORNARO, G.; PEDUTO, D. Advanced low-and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. **Eng. Geol.** 112 (1), 29–42. 2010.

CHEN, D. L.; LU, Y. Y.; JIA, D. Z. Land deformation associated with exploitation of groundwater in Changzhou City measured by COSMO-SkyMed and Sentinel-1A SAR data. **Open Geosci.**, 10, 678–687, 2018.

CHEN, X. *et al.* Combining Sentinel-1 Interferometry and Ground-Based Geomatics Techniques for Monitoring Buildings Affected by Mass Movements. **Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 452, 28 jan. 2021.

CHEN, Y. X.; LI, Y. K.; WANG, Y. Y.; ZHANG, M.; CUI, Z.; YI, C.; LIU, G. Late Quaternary glacial history of the Karlik Range, easternmost Tian Shan, derived from ¹⁰Be surface exposure and optically stimulated luminescence datings. **Quat. Sci. Rev.**, 115, 17–27, 2015.

CHEN, Y.; TONG, Y.; TAN, K. Coal Mining Deformation Monitoring Using SBAS-InSAR and Offset Tracking: A Case Study of Yu County, China. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 6077–6087, 2020.

CIAMPALINI, A. *et al.* Integration of Satellite InSAR with a Wireless Network of Geotechnical Sensors for Slope Monitoring in Urban Areas: The Pariana Landslide Case (Massa, Italy). **Remote Sensing**, v. 13, n. 13, p. 2534, 29 jun. 2021.

CIGNA, F. *et al.* 25 years of satellite InSAR monitoring of ground instability and coastal geohazards in the archaeological site of Capo Colonna, Italy. SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XVI. **Anais...SPIE**, 18 out. 2016.

CIGNA, F.; BIANCHINI, S.; CASAGLI, N. How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach. **Landslides** 10 (3), 267–283. 2013.

CIGNA, F.; LIGUORI, V.; DEL VENTISETTE, C.; CASAGLI, N. Landslide impacts on Agrigento's Cathedral imaged with radar interferometry. In: **Landslide Science and Practice**. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 475–481. 2013.

CIGNA, F.; RAMÍREZ, R. E.; TAPETE, D. Accuracy of sentinel-1 PSI and SBAS InSAR displacement velocities against GNSS and geodetic leveling monitoring data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 23, 1 dez. 2021.

CIGNA, F.; TAPETE, D. Sentinel-1 Big Data Processing with P-SBAS InSAR in the Geohazards Exploitation Platform: An Experiment on Coastal Land Subsidence and Landslides in Italy. **Remote Sensing**, v. 13, n. 5, p. 1–26, 2021.

COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. **Engineering Geology**, v. 68, n. 1, p. 3-14, 2003. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00195-3.

COLESANTI, C.; MOUELIC, S.L.; BENNANI, M.; RAUCOULES, D.; CARNEC, C.; FERRETTI, A. Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique—a case study in the east of France. **Int. J. Remote Sens.** 26 (1), 201–207. 2005.

CONFUORTO, P.; PLANK, S.; NOVELLINO, A.; TESSITORE, S.; RAMONDINI, M. Implementation of DInSAR methods for the monitoring of the archaeological site of Hera Lacinia in Crotona (Southern Italy). *Rend. Online Soc. Geol. Ital.* 2016, 41, 231–234.

CORREIA, A.H. **Metodologias e Resultados Preliminares do Projeto Radiografia da Amazônia**. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Curitiba. Anais...Curitiba: INPE, 2011. p.8083-8090.

CORSETTI, M. *et al.* Advanced SBAS-DInSAR Technique for Controlling Large Civil Infrastructures: An Application to the Genzano di Lucania Dam. **Sensors**, v. 18, n. 7, p. 2371, 21 jul. 2018.

CROSETTO, M. *et al.* Persistent Scatterer Interferometry: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. Elsevier B.V., , 1 maio 2016.

CROSETTO, M., Monserrat, Cuevas-Gonzalez, M., Devanthery, N., Crippa, B., 2016. Interferometria de espalhador persistente: uma revisão. *ISPRS J. Photogramm. Sensor remoto* 115, 78–89.

CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; DEVANTHÉRY, N.; LUZI, G.; CRIPPA, B. Measuring thermal expansion using X-band persistent scatterer interferometry. **ISPRS J.** 100, 84–91. 2015.

Curlander, J.C.; Macdonough, R. N. Synthetic aperture radar - System and signal processing. New York: John Wiley & Sons, 1991.

DI MARTIRE, D.; IGLESIAS, R.; MONELLS, D.; CENTOLANZA, G.; SICA, S.; RAMONDINI, M.; PAGANO, L.; MALLORQUÍ, J.J.; CALCATERRA, D. Comparison between differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy). **Remote Sens. Environ.** 148, 58–69. 2014.

DI TRAGLIA, F. *et al.* Lava delta deformation as a proxy for submarine slope instability. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 488, p. 46–58, 15 abr. 2018.

DIXON, T.H.; AMELUNG, F.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; ROCCA, F.; DOKKA, R.; SELLA, G.; KIM, S. W.; WADOWINSKI, S.; WHITMAN, D. Space geodesy: subsidence and flooding in New Orleans. **Nature** 441 (7093), 587–588. 2006.

DONG, J. *et al.* Multi-scale deformation monitoring with Sentinel-1 InSAR analyses along the Middle Route of the South-North Water Diversion Project in China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 100, 1 ago. 2021.

DU, Q. *et al.* The Stability Analysis Method of Leveling Datum Points in Mining Areas of Western China Based on SBAS-InSAR Technology. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 26, n. 12, p. 5264–5274, 7 dez. 2022.

DU, Z. *et al.* Risk assessment for tailings dams in Brumadinho of Brazil using InSAR time series approach. **Science of The Total Environment**, v. 717, p. 137125, maio 2020.

DUTRA, Luciano Vieira *et al.* Processamento de imagens de radar de abertura sintética—princípios e aplicações. In: **Anais do iv workshop em tratamento de imagens, npdi/dcc/icex/ufmg**. 2003.

EMBRAPA TERRITORIAL. Satélites de Monitoramento. Campinas, 2018. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento> >. Acesso em: 9 jan. 2023

ESA. European Space Agency. **ASAR Product Handbook**, 2007. Disponível em:<https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/ASAR/asar.ProductHandbook.2_2.pdf>. Acesso em: 30 dez. 2022.

ESA. European Space Agency. ASAR Product Handbook, 2007. Disponível em: <https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/ASAR/asar.ProductHandbook.2_2.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2019.

ESCAYO, J. *et al.* Radar Interferometry as a Monitoring Tool for an Active Mining Area Using Sentinel-1 C-Band Data, Case Study of Riotinto Mine. **Remote Sensing**, v. 14, n. 13, p. 3061, 25 jun. 2022.

F. GAMA, F. *et al.* Deformations Prior to the Brumadinho Dam Collapse Revealed by Sentinel-1 InSAR Data Using SBAS and PSI Techniques. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 3664, 9 nov. 2020.

FARINA, P. Prediction of sinkholes induced by solution mining through the inverse velocity method. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/348357441>>.

FARINA, P.; COLOMBO, D.; FUMAGALLI, A.; MARKS, F.; MORETTI, S. Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. **Eng. Geol.** 88 (3), 200–217. 2006.

FERRETTI, A. *et al.* A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3460–3470, set. 2011.

FERRETTI, A. *et al.* User's guide : procurement of plant : design, supply and install. [s.l: s.n.].

FERRETTI, A. **Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space**. The Netherlands: EAGE Publications bv, 2014. 178 p. ISBN: 978-90-73834-71-2.

FERRETTI, A.; FERRUCCI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique. In: **IGARSS 2000. IEEE**

2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings, 2000, v. 7. p. 3219-3221. DOI: 10.1109/IGARSS.2000.860388.

FERRETTI, A.; FUMAGALLI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F.; A. RUCCI, A. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3460-3470, 2011. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465.

FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. **InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation.** ESA Publications, 48 p. 2007.

FERRETTI, A.; NOVALI, F.; BÜRGMANN, R.; HILLEY, G.; PRATI, C. InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in San Francisco Bay area. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 85 (34), 317–324. 2004.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2202-2212, 2000b. DOI: 10.1109/36.868878.

FINATTO, H. **Proposta de antena para aplicação em radar de abertura sintética na banda C embarcada em veículo aéreo de pequeno porte.** Orientador: Marcos Vinício Thomas Heckler. 2021. 102p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia de Telecomunicações, Alegrete, 2021.

FRANK H. Electromagnetic Wave Spectrum, 2007. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrumes.svg#/media/File:Electromagnetic_spectrum-pt_br.svg>. Acesso em: 15 jan. 2023.

FRATTINI, P. *et al.* Activity and kinematic behaviour of deep-seated landslides from PS-InSAR displacement rate measurements. **Landslides**, v. 15, n. 6, p. 1053–1070, 1 jun. 2018.

FUNNING, G.J.; BÜRGMANN, R.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; FUMAGALLI, A. Creep on the Rodgers Creek fault, northern San Francisco Bay area from a 10 year PS-InSAR dataset. **Geophys. Res. Lett.** 34 (19). 2007.

GABOARDI, C. **Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra: Floresta Nacional do Tapajós.** 2002. 137p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensores Remotos e Aplicações) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/marciana/2003/04.10.08.52>>. Acesso em: 30 dez. 2022.

GABRIEL, A. K.; GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 94, n. B7, p. 9183-9191, 1989. DOI: 10.1029/JB094iB07p09183.

GALLOWAY, D. L.; BURBEY, T. J. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, v. 19, n. 8, p. 1459–1486, dez. 2011.

GAMA, F. F.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; SANTOS, A. Técnicas de interferometria radar na detecção de deformação superficial utilizando dados orbitais. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais [...]**. 2013, p. 13-18.

GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; ASSIS, L. M. Proposta de avaliação de técnicas de interferometria diferencial avançada (A-Dinsar) de dados SAR orbitais dos satélites TerraSAR-X e COSMO-SkyMed no monitoramento de instabilidade de minas de ferro a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero-MG. In: Anais XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa, Brasil. **Anais [...]**. 2015, p. 1539-1546.

GERNHARDT, S.; ADAM, N.; EINEDER, M.; BAMLER, R. Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas. **Ann. GIS** 16 (2), 103–111. 2010.

GERNHARDT, S.; AUER, S.; EDER, K. Persistent scatterers at building facades – evaluation of appearance and localization accuracy. **ISPRS J.** 100, 92–105. 2015.

GERNHARDT, S.; BAMLER, R.; Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI. **ISPRS J.** 73, 68–79. 2012.

GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A.; WERNER, C. L. Satellite radar interferometry: Twodimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v. 23, n. 4, p. 713-720, 1988. DOI: 0.1029/RS023i004p00713.

GRAHAM, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, p. 763-768, 1974.

GREBBY, S. *et al.* Remote monitoring of ground motion hazards in high mountain terrain using insar: A case study of the lake sazez area, tajikistan. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 18, 1 set. 2021.

GUO, C. *et al.* Study on the Creep-Sliding Mechanism of the Giant Xiongba Ancient Landslide Based on the SBAS-InSAR Method, Tibetan Plateau, China. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3365, 25 ago. 2021.

HANSSSEN, R. F. **Radar interferometry: data interpretation and error analysis.** Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p. ISBN: 0-7923-6945-9.

HARTWIG, M. E. **Monitoramento de taludes de mineração por interferometria diferencial com dados Terrasar-X na Amazônia: Mina de N4W, Serra de Carajás, Pará, Brasil.** 2014. 232 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.

- HASANUDDIN, Z. *et al.* Gamal Environmental Impacts of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia FIG Working Week. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/277667741>>.
- HERRERA, G.; NOTTI, D.; GARCÍA-DAVALILLO, J.C.; MORA, O.; COOKSLEY, G.; SÁNCHEZ, M.; ARNAUD, A.; CROSETTO, M. Analysis with C- and X-band satellite SAR data of the Portalet landslide area. **Landslides** 8 (2), 195–206. 2011.
- HERRERA, G.; TOMÁS, R.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, J.M.; DELGADO, J.; MALLORQUI, J.J.; DUQUE, S.; MULAS, J. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). **Eng. Geol.** 90 (3), 148–159. 2007.
- HERRERA, G.; TOMÁS, R.; LOPEZ-SANCHEZ, J.M.; DELGADO, J.; VICENTE, F.; MULAS, J.; COOKSLEY, G.; SANCHEZ, M.; DURO, J.; ARNAUD, A.; BLANCO, P.; DUQUE, S.; MALLORQUÍ, J. J.; DE LA VEGA-PANIZO, R.; MONSERRAT, O. Validation and comparison of advanced differential interferometry techniques: Murcia metropolitan area case study. **ISPRS J.** 64, 501–512. 2009.
- HOOPER, A. J. **Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modelling of volcanic deformation.** 2006. 144 f. Thesis (PhD) – Department of Geophysics, Stanford University, 2006.
- HOOPER, A.; PEDERSEN, R.; SIGMUNDSSON, F. Constraints on magma intrusion at Eyjafjallajökull and Katla volcanoes in Iceland, from time series SAR interferometry. In: **The VOLUME Project–Volcanoes: Understanding Subsurface Mass Movement.** University College, Dublin, pp. 3–24. 2009.
- HOOPER, A.; ZEBKER, H.; SEGALL, P.; KAMPES, B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. **Geophys. Res. Lett.** 31 (23). 2004.
- HÖSER, T. Analysing the Capabilities and Limitations of InSAR using Sentinel-1 data for Landslide Detection and Monitoring. 2018.
- HOU, J. *et al.* Block PS-InSAR ground deformation estimation for large-scale areas based on network adjustment. **Journal of Geodesy**, v. 95, n. 10, 1 out. 2021.
- HSIEH, C.-S.; LIN, D.-Y. Establish an efficient method to monitor slope deformation using PS-InSAR, MUAUV, and surveillance cameras. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 31, n. 6, p. 663–675, 2020.
- HU, J. *et al.* Estimating three-dimensional coseismic deformations with the SM-VCE method based on heterogeneous SAR observations: Selection of homogeneous points and analysis of observation combinations. **Remote Sensing of Environment**, v. 255, 15 mar. 2021.
- HUANG, Y; VAN GENDEREN, J. L. Comparison of several multi-look processing procedures in InSAR processing for ERS-1&2 tandem mode. In: ERS SAR INTERFEROMETRY "Fringe 96", 1996, Zurich, Switzerland. **Proceedings...** Paris: ESA, 1997. 215p.

INTRIERI, E. *et al.* The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. **Landslides**, v. 15, n. 1, p. 123–133, 9 jan. 2018.

INTRIERI, E.; CARLÀ, T.; GIGLI, G. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review. **Earth-Science Reviews**, v. 193, p. 333–349, jun. 2019a.

JÄNICHEN, J. *et al.* Monitoring of Radial Deformations of a Gravity Dam Using Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. **Remote Sensing**, v. 14, n. 5, p. 1112, 24 fev. 2022.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP: Ed Parêntese, 2009. 598 p.. Traduzido por José Carlos Neves Epiphano et. Al.

JIANG, L.; LIN, H.; CHENG, S. Monitoring and assessing reclamation settlement in coastal areas with advanced InSAR techniques: Macao city (China) case study. **Int. J. Remote Sens.** 32 (13), 3565–3588. 2011.

JUST, D.; BAMLER, R. Phase Statistics of Interferograms with Applications to Synthetic Aperture Radar. **Applied Optics**, v. 33, n 20, p. 4361-4368, 1994. DOI:10.1364/AO.33.004361

KARILA, K.; KARJALAINEN, M.; HYYPPÄ, J.; KOSKINEN, J.; SAARANEN, V.; ROUHIAINEN, P. A comparison of precise leveling and persistent scatterer SAR interferometry for building subsidence rate measurement. **ISPRS Int. J. Geo-Inform.** 2 (3), 797–816. 2013.

KIM, S.W.; WDOWINSKI, S.; DIXON, T.H.; AMELUNG, F.; KIM, J.W.; WON, J.S. Measurements and predictions of subsidence induced by soil consolidation using persistent scatterer InSAR and a hyperbolic model. **Geophys. Res. Lett.** 37 (5). 2010.

LAN, H.; LI, L.; LIU, H.; YANG, Z. Complex urban infrastructure deformation monitoring using high resolution PSI. **J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.** 5 (2), 643–651. 2012.

LANARI, R.; CASU, F.; MANZO, M.; LUNDGREN, P. Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: a case study of the Hayward fault, California. **Remote Sens. Environ.** 109 (1), 20–28. 2007.

LANARI, R.; CASU, F.; MANZO, M.; LUNDGREN, P. Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 1, p. 20-28, 2007. DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.003.

LANARI, R.; MORA, O.; MANUNTA, M.; MALLORQUI, J. J.; BERARDINO, P.; SANSOSTI, E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 7, p. 1377-1386, 2004. DOI: 10.1109/TGRS.2004.828196.

LANARI, R.; ZENI, G.; MANUNTA, M.; GUARINO, S.; BERARDINO, P.; SANSOSTI, E. An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: a case study of the city of Naples, Italy. **Int. J. Remote Sens.** 25 (14), 2855–2867. 2004.

LEE, Y.-K.; HONG, S.-H.; KIM, S.-W. Monitoring of Water Level Change in a Dam from High-Resolution SAR Data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3641, 12 set. 2021.

LIANG, J. *et al.* Discussion on InSAR Identification Effectivity of Potential Landslides and Factors That Influence the Effectivity. **Remote Sensing**, v. 14, n. 8, p. 1952, 18 abr. 2022.

LIAO MINGSHENG, Lin Hui, “Synthetic aperture radar interferometry— Principle and Signal Processing,” Published by Surveying and Mapping Press, 2003.

LIN, S.-Y. Urban hazards caused by ground deformation and building subsidence over fossil lake beds: a study from Taipei City. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 13, n. 1, p. 2890–2910, 31 dez. 2022.

LIU, D.; SOWTER, A.; NIEMEIER, W. Process-related deformation monitoring by PSI using high resolution space-based SAR data: a case study in Düsseldorf, Germany. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.** 2 (7), 4813–4830. 2014.

LIU, N. *et al.* High Spatio-Temporal Resolution Deformation Time Series with the Fusion of InSAR and GNSS Data Using Spatio-Temporal Random Effect Model. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 57, n. 1, p. 364–680, 1 jan. 2019a.

LIU, W. *et al.* Using Bibliometric Analysis to Understand the Recent Progress in Agroecosystem Services Research. **Ecological Economics**, v. 156, p. 293–305, fev. 2019b.

LIU, Z. *et al.* Monitoring landslide associated with reservoir impoundment using synthetic aperture radar interferometry: A case study of the Yalong reservoir. **Geodesy and Geodynamics**, v. 13, n. 2, p. 138–150, mar. 2022.

LUNDGREN, P.; CASU, F.; MANZO, M.; PEPE, A.; BERARDINO, P.; SANSOSTI, E.; LANARI, R. Gravity and magma induced spreading of Mount Etna volcano revealed by satellite radar interferometry. **Geophys. Res. Lett.** 31 (4). 2004.

Luzi, Guido & Pieraccini, Massimiliano & Mecatti, Daniele & Noferini, Linhsia & Guidi, Gabriele & Moia, Fabio & Atzeni, C.. (2004). Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: Atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data. **Geoscience and Remote Sensing**, IEEE Transactions on. 42. 2454 - 2466. DOI:10.1109/TGRS.2004.836792.

MACEDO, K. A. C.; WIMMER, C.; BARRETO, T. L. M.; LÜBECK D.; MOREIRA, J. R.; RABACO, L. M. L.; OLIVEIRA, W. J. Operacionalização da interferometria diferencial (D-InSAR) para o sistema OrbiSAR – Estudo de caso realização na região de São Sebastião, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR)., 2011, Curitiba. **Anais [...]** São José dos Campos: INPE,

2011. p. 8207-8214. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/39UGNS8>>. Acesso em: 08 dez. 2022.

MALTESE, A. *et al.* Toward a Comprehensive Dam Monitoring: On-Site and Remote-Retrieved Forcing Factors and Resulting Displacements (GNSS and PS–InSAR). **Remote Sensing**, v. 13, n. 8, p. 1543, 16 abr. 2021.

MASSONNET, D.; ROSSI, M.; CARMONA, C.; ADRAGNA, F.; PELTZER, G.; FEIGL, K.; RABAUTE, T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. **Nature**, v. 364, n. 6433, p. 138-142, 1993. DOI: 10.1038/364138a0.

MAZZANTI, P. *et al.* Tracking Deformation Processes at the Legnica Glogow Copper District (Poland) by Satellite InSAR—II: Żelazny Most Tailings Dam. **Land**, v. 10, n. 6, p. 654, 18 jun. 2021.

MCCORMACK, H.; THOMAS, A.; SOLOMON, I. The capabilities and limitations of satellite InSAR and terrestrial radar interferometry. United Kingdom: [s.n.]. Disponível em: <www.fugro-npa.com>. Acesso em: 31 jan. 2023.

MECATTI, DANIELE & MACALUSO, GIOVANNI & BARUCCI, ANDREA & NOFERINI, LINHSIA & PIERACCINI, MASSIMILIANO & ATZENI, C.. (2010). Monitoring open-pit quarries by interferometric radar for safety purposes.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. **Universidade de Brasília, Brasília**, 2012.

MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **International Journal of Surgery**, v. 8, n. 5, p. 336–341, 2010.

MOHR, J. J.; MADSEN, S. N. Error analysis for interferometric SAR measurements of ice sheet flow. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 99), 1999, New York. **Proceedings...** Piscataway, NJ : IEEE, 1999. v. 1, p. 98-100.

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, v. 106, n. 1, p. 213–228, 19 jan. 2016.

MONSERRAT, O.; CROSETTO, M.; LUZI, G. A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 93. 40–48. 10.1016/j.isprsjprs.2014.04.001. 2014.

MOREIRA, A. *et al.* A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and remote sensing magazine**, v. 1, n. 1, p. 6-43, 2013.

MOREIRA, L., CASTRO, F., GOES, J. A., BINS, L., TERUEL, B., FRACAROLLI, J., ... HERNANDEZ-FIGUEROA, H. E. (2019). A Drone-borne Multiband DInSAR: Results and Applications. **IEEE Radar Conference (RadarConf)**. doi:10.1109/radar.2019.8835653

MOREIRA, L.; CASTRO, F.; GÓES, J.A.; BINS, L.; TERUEL, B.; FRACAROLLI, J.; CASTRO, V.; ALCÂNTARA, M.; ORÉ, G.; LUEBECK, D.; et al. A Drone-borne Multiband DInSAR: Results and Applications. In Proceedings of the 2019 **IEEE Radar Conference (RadarConf)**, Boston, MA, USA, 22-26 April 2019; pp. 1–6.

MORETTO, S.; BOZZANO, F.; MAZZANTI, P. The role of satellite insar for landslide forecasting: Limitations and openings. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, 1 set. 2021.

MOTAGH, M.; HOFFMANN, J.; KAMPES, B.; BAES, M.; ZSCHAU, J. Strain accumulation across the Gazikoy–Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements. **Earth Planet. Sci. Lett.** 255 (3), 432–444. 2007.

MOURATIDIS, A. 2010. “Contribution of -GPS and GIS-Assisted Spaceborne Remote Sensing in the Morphotectonic Research of Central Macedonia (N. Greece).” PhD thesis, Aristotle University of Thessaloniki, 220 p. (in Greek with English abstract).

MOURO, C.; SANTOS, T.; CASTRO, P. Past-present discontinuity in ecological change and marine governance: An integrated narrative approach to artisanal fishing. *Marine Policy*, v. 97, p. 163–169, nov. 2018.

MUHAMMAD, M. *et al.* Applications of Image-Based Computer Vision for Remote Surveillance of Slope Instability. **Frontiers in Earth Science**, v. 10, 23 jun. 2022.

MURA, J. C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR.** 2000. 159p. (INPE-8209-TDI/764). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.24>>. Acesso em: 08 dez. 2022.

MURA, J. C. **Processamento de imagens SAR: interferometria de imagens SAR.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Notas de aula.

Mura, J. C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR.** Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

NIEVINSKI, F. G. **Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR).** Trabalho de conclusão apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Cartógrafo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

NOFERINI L, PIERACCINI M, MECATTI D, LUZI G, ATZENI C, TAMBURINI A. “Permanent scatterers analysis for atmospheric correction in ground based SARInterferometry,” **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing.** 2005,43(7), pp.152-157

- NOTTI, D.; DAVALILLO, J.C.; HERRERA, G.; MORA, O. Assessment of the performance of X-band satellite radar data for landslide mapping and monitoring: upper Tena Valley case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 1865–1875. 2010.
- NOVO, E.L.M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 2 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2008. 363 p.
- OTHMAN, A. A. *et al.* Application of DInSAR-PSI Technology for Deformation Monitoring of the Mosul Dam, Iraq. **Remote Sensing**, v. 11, n. 22, p. 2632, 11 nov. 2019.
- PAPOUTSIS, I. *et al.* InSAR Greece with Parallelized Persistent Scatterer Interferometry: A National Ground Motion Service for Big Copernicus Sentinel-1 Data. **Remote Sensing**, v. 12, n. 19, p. 3207, 1 out. 2020.
- PARADELLA, W. R. *et al.* Radares Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa-PB**, p. 2506-2513, 2015.
- PARADELLA, W. R., MURA, J. C., GAMA, F. F. **Monitoramento DInSAR para Mineração e Geotecnia: A tecnologia DInSAR orbital na mineração e geotecnia: monitoramento do espaço de deformações na superfície**. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2021, 160p. ISBN: 978-65-86235-19-7.
- PATRÍCIO, E. d. G. R.. **Avaliação da Tecnologia InSar para Monitorização de Grandes Obras**. Faculdade de Ciências - Universidade do Porto. 2018. URL: <https://hdl.handle.net/10216/116691>
- PEPE, A.; CALÒ, F.. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements. **Applied Sciences**, v. 7, n. 12, p. 1264, 2017.
- PIERACCINI, M.; MICCINESI, L. Ground-based radar interferometry: A bibliographic review. **Remote Sensing**, v. 11, n. 9, p. 1029, 2019. DOI:10.3390/rs11091029
- PIERACCINI, MASSIMILIANO & LUZI, GUIDO & MECATTI, DANIELE & NOFERINI, LINHSIA & MACALUSO, GIOVANNI & ATZENI, C.. (2006). Ground-Based Radar Interferometry for Monitoring Unstable Slopes. DOI:10.1109/IGARSS.2006.1048
- PINHEIRO, M., AMAO-OLIVA, J., SCHEIBER, R., JAEGER, M., HORN, R., KELLER, M., FISCHER, J., & REIGBER, A. (2020). Dual-frequency airborne SAR for large scale mapping of tidal flats. **Remote Sensing**, 12(11). <https://doi.org/10.3390/rs12111827>
- PINTO, C. de A. **Detecção de deformações superficiais na Mina do Manganês do Azul através da Interferometria de Radar Orbital**. 2015. 196p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.31.16.19-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JUHDQH>>. Acesso em: 08 jan. 2022.

PIZZANI, L. *et al.* ÁA arte da pesquisa bibliográfica na busca do conhecimento
<i>The art of literature in search of knowledge</i> RDBCI: **Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, v. 10, n. 1, p. 53, 10 jul. 2012.

PLUYE, P.; HONG, Q. N. Combining the Power of Stories and the Power of Numbers: Mixed Methods Research and Mixed Studies Reviews. **Annual Review of Public Health**, v. 35, n. 1, p. 29–45, 18 mar. 2014.

PRATESI, F.; TAPETE, D.; TERENCEI, G.; DEL VENTISETTE, C.; MORETTI, S. Structural assessment of case study historical and modern buildings in the florentine area based on a PSI-driven seismic and hydrogeological risk analysis. In: **Engineering Geology for Society and Territory** – Volume 8. Springer International Publishing, pp. 345–349. 2015.

QIU, Zhiwei. DEFORMATION MONITORING OF LARGE STRUCTURES BY GROUND-BASED SAR INTERFEROMETRY. **Bulletin of Geodetic Sciences**, [S.I.], v. 22, n. 1, mar. 2016. ISSN 1982-2170. Available at: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/46105>>. Date accessed: 12 feb. 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100003>.

RADMAN, A.; AKHOONDZADEH, M.; HOSSEINY, B. Integrating InSAR and deep-learning for modeling and predicting subsidence over the adjacent area of Lake Urmia, Iran. **GIScience and Remote Sensing**, v. 58, n. 8, p. 1413–1433, 2021.

RAMIREZ, R. A. *et al.* Monitoring of construction-induced urban ground deformations using Sentinel-1 PS-InSAR: The case study of tunneling in Dangjin, Korea. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 108, 1 abr. 2022.

RAMOS, F. L. G. **Desenvolvimento de técnicas para processamento de dados orbitais de interferometria SAR em regiões equatoriais úmidas: estudo de caso em Manaus, Amazonas, Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 91p., 2013.

RASPINI, F. *et al.* Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. **Earth-Science Reviews**, v. 235, p. 104239, dez. 2022.

RAUCOULES, D.; BOURGINE, B.; DE MICHELE, M.; LE COZANNET, G.; CLOSSET, L.; BREMMER, C.; VELDKAMP, H.; TRAGHEIM, D.; BATESON, L.; CROSETTO, M.; AGUDO, M.; ENGD AHL, M. Validation and intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry: PSIC4 project results. **J. Appl. Geophys.** 68 (3), 335–347. 2009.

REALE, D.; NITTI, D. O.; PEDUTO, D.; NUTRICATO, R.; BOVENGA, F.; FORNARO, G. Postseismic Deformation Monitoring With the COSMO/SKYMED Constellation. **IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 696-700, jul. 2011.

REBELO, C. R. **Aplicação do InSAR na geração de modelos digitais do terreno**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007.

REGUZZONI, M. *et al.* GNSS-Based Dam Monitoring: The Application of a Statistical Approach for Time Series Analysis to a Case Study. **Applied Sciences**, v. 12, n. 19, p. 9981, 4 out. 2022.

REIGBER, A., & SCHEIBER, R. (2003). Airborne differential SAR interferometry: First results at L-band. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 41(6 PART II), 1516–1520. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.814610>

RIGHINI, G.; PANCIOLI, V.; CASAGLI, N. Updating landslide inventory maps using Persistent Scatterer Interferometry (PSI). **Int. J. Remote Sens.** 33 (7), 2068–2096. 2012.

ROQUE, D. *et al.* Integrated InSAR and GNSS Monitoring Subsystem for an Arch Dam and Reservoir Banks. 2021a.

ROSI, A.; VANNOCCI, P.; TOFANI, V.; GIGLI, G.; CASAGLI, N. Landslide characterization using satellite interferometry (PSI), geotechnical investigations and numerical modelling: the case study of Ricasoli Village (Italy). **Int. J. Geosci.** 4 (05), 904. 2013.

SABATER, J. R.; DURO, J.; ARNAUD, A.; ALBIOL, D.; KOUDOGBO, F. N. Comparative analyses of multi-frequency PSI ground deformation measurements. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING – SPIE, 2011. Prague, Czech Republic. 2011. **Proceedings...** Prague: SPIE, 2011. v. 8179. p. 81790M - 81790-12M.

SAMIEI-ESFAHANY, S. **Exploitation of distributed scatterers in synthetic aperture radar interferometry**. 2017. 225 f. Thesis (PhD) – Faculty Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands, 2017

SANSOSTI, E.; BERARDINO, P.; BONANO, M.; CALÒ, F.; CASTALDO, R.; CASU, F.; MANUNTA, M.; MANZO, M.; PEPE, A.; SOLARO, G.; TIZZANI, P.; ZENI, G.; LANARI, R. How second generation SAR systems are impacting the analysis of ground deformation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 28, p. 1-11, 2014.

SCHMIDT, D.A.; BÜRGMANN, R. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. **J. Geophys. Res.: Solid Earth** (1978–2012) 108 (B9). 2003.

SEA AND LAND TECHNOLOGIES Pte Ltd. Ibis-FM EVO. Disponível em: <<https://sea-landtech.com/product/ibis-fm-evo/>>.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 104, p. 333–339, nov. 2019.

SILVA, G. P.; COUTINHO, R. Q.; ROSA, R. A., Silva. An Approach To Positional Quality Control Methods For Airborne InSAR High-Resolution X-Band Orthoimages And P-Band Digital Terrain Model. **Bulletin of Geodetic Sciences**, p. 1-18, 2021. DOI 10.1590/s1982-21702021000100001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bcg/a/MQSV87PqNyC8KtJDt8RQXkb/?lang=en>. Acesso em: 24 fev. 2023.

SOLARI, L. *et al.* From ERS 1/2 to Sentinel-1: Subsidence Monitoring in Italy in the Last Two Decades. **Frontiers in Earth ScienceFrontiers Media S.A.**, , 4 out. 2018b.

SOLARI, L. *et al.* PSInSAR analysis in the pisa urban area (Italy): A case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, 2016.

SOLARI, L. *et al.* Satellite radar data for back-analyzing a landslide event: the Ponzano (Central Italy) case study. **Landslides**, v. 15, n. 4, p. 773–782, 1 abr. 2018a.

SOLARI, L., DOTTA, G., FERRIGNO, F., CASAGLI, N., 2017. O deslizamento Calatabiano (sul da Itália): dados preliminares de monitoramento GB-InSAR e mapeamento 3D remoto. *Deslizamentos de terra* 14 (2), 1–12.

SOUSA, J. *et al.* Satellite SAR Interferometry for Monitoring Dam Deformations in Portugal. 2015. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/275823701_Satellite_SAR_Interferometry_for_Monitoring_Dam_Deformations_in_Portugal >.

SOUSA, J. J., MAGALHÃES, L. G., RUIZ, A. M., SOUSA, A. M. R., & CARDOSO, G. (2013). The viStaMPS tool for visualization and manipulation of time series interferometric results. **Computers and Geosciences**, 52, 409–421. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.012>

SOUSA, J.J.; BASTOS, L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** 13 (3), 659–667. 2013.

SOUSA, J.J., Magalhães, L.M., Ruiz, A.M., Sousa, A.M.R. e Cardoso, G. (2013): *The viStaMPS tool for visualization and manipulation of time series interferometric results*, *Comput. Geosci.*, 52, 409–421. doi: 10.1016/j.cageo.2012.11.012.

SOUZA, W. de O. **InSAR para avaliação de subsidência do solo devido a ações antrópicas sobre os recursos hídricos subterrâneos e sobre o solo na planície do Recife, Brasil.** 2022. 295 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

STROZZI, T.; TEATINI, P.; TOSI, L. TerraSAR-X reveals the impact of the mobile barrier works on Venice coastland stability. **Remote Sens. Environ.** 113 (12), 2682–2688. 2009.

TANG, W.; MOTAGH, M.; ZHAN, W. Monitoring active open-pit mine stability in the Rhenish coalfields of Germany using a coherence-based SBAS method.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 93, p. 102217, dez. 2020.

TAPETE, D.; CIGNA, F. Rapid mapping and deformation analysis over cultural heritage and rural sites based on Persistent Scatterer Interferometry. **Int. J. Geophys.** 2012, 19p.

TARCHI, D. & Casagli, Nicola & Fanti, Riccardo & Leva, David & Luzi, Guido & Pasuto, Alessandro & Pieraccini, Massimiliano & Silvano, Sandro. (2003). Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: An example of application to the Tessina landslide in Italy. **Engineering Geology**. 68. 15-30. 10.1016/S0013-7952(02)00196-5.

TARCHI, D., Antonello, G., Casagli, N., Farina, P., Fortuny-Guasch, J., Guerri, L., Leva, D., 2005. On the use of ground-based SAR interferometry for early warning of slope failure: The Cortenova rock slide (Italy). In: **Landslides: risk analysis and sustainable disaster management**, pp. 337–342.

TAYLOR, S. C.; ARMOUR, B.; HUGHES, W. H.; KULT, A.; NIZMAN, C. Operational Interferometric SAR data processing for RADARSAT using distributed computing environment. In: **Proceedings of the IV International Conference on GeoComputation Fredericksburg**, VA, USA, 1999.

TEATINI, P.; CASTELLETTO, N.; FERRONATO, M.; GAMBOLATI, G.; JANNA, C.; CAIRO, E.; MARZORATI, D.; COLOMBO, D.; FERRETTI, A.; BAGLIANI, A.; BOTTAZZI, F. Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy. **J. Geophys. Res.: Earth Surf.** (2003–2012) 116 (F2). 2011.

TEATINI, P.; TOSI, L.; STROZZI, T.; CARBOGNIN, L.; CECCONI, G.; ROSSELLI, R.; LIBARDO, S. Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. **Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C** 40, 72–79. 2012.

TOMÁS, R.; CANO, M.; GARCÍA-BARBA, J.; VICENTE, F.; HERRERA, G.; LOPEZ-SANCHEZ, J.M.; MALLORQUÍ, J.J. **Monitoring an earthfill dam using differential SAR interferometry: La Pedrera dam, Alicante, Spain.** **Eng. Geol.** 157, 21–32. 2013.

TORRES, D. R. **Análise Multitemporal do Uso da Terra e Cobertura Florestal com dados os satélites Landsat e Alos.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. 2011, 197p.

ULABY, F. T. Radar signature of terrain: useful monitors of renewable resources. **Proceedings of IEEE**, v. 70, n. 12, p.1410-1428, 1982.

VALLONE, P.; GIAMMARINARO, M.S.; CROSETTO, M.; AGUDO, M.; BIESCAS, E. Ground motion phenomena in Caltanissetta (Italy) investigated by InSAR and geological data integration. **Eng. Geol.** 98 (3), 144–155. 2008.

VASCO, D.W.; FERRETTI, A.; NOVALI, F. Reservoir monitoring and characterization using satellite geodetic data: interferometric synthetic aperture radar observations from the Krechba field, Algeria. **Geophysics** 73 (6), WA113– WA122. 2008.

VASCO, D.W.; RUCCI, A.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; BISSELL, R.C.; RINGROSE, P.S.; MATHIESON, A. S.; WRIGHT, I.W. Satellite-based measurements of surface deformation reveal fluid flow associated with the geological storage of carbon dioxide. **Geophys. Res. Lett.** 37 (3). 2010.

VICTORINO, H. S. **Análise de deformação em pilhas de disposição de estéril (NWI, W e SIV) no Complexo Minerador de Carajás com uso de dados Stripmap do Satélite TerraSAR-X.** 2016. 146p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LAKPKL>>. Acesso em: 08 jan. 2022.

WANG, P.; XING, C.; PAN, X. Reservoir Dam Surface Deformation Monitoring by Differential GB-InSAR Based on Image Subsets. **Sensors**, v. 20, n. 2, p. 396, 10 jan. 2020.

WANG, Z. *et al.* Landslide Inventory in the Downstream of the Niulanjiang River with ALOS PALSAR and Sentinel-1 Datasets. **Remote Sensing**, v. 14, n. 12, p. 2873, 15 jun. 2022.

WASOWSKI, J.; BOVENGA, F.; REFICE, A.; NITTI, D.; NUTRICATO, R. High resolution PSI for mapping ground deformations and infrastructure instability. **Engineering Geology for Society and Territory**, vol. 2. 399–403. 2015.

WEGMÜLLER, U.; WALTER, D.; SPRECKELS, V.; WERNER, C. Non-uniform ground-motion monitoring with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, p. 895-904, 2010.

WEI, X.; WENKAI, F. Application of Slope Radar (S-SAR) in Emergency Monitoring of the “11.03” Baige Landslide. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2021, p. 1–12, 27 out. 2021.

Woods, Adam & Hendry, Michael & Macciotta, Renato & Stewart, Tom & Marsh, Julia. (2020). GB-InSAR monitoring of vegetated and snow-covered slopes in remote mountainous environments. **Landslides**. 17. DOI: 10.1007/s10346-020-01408-4.

YANG, C. *et al.* Monitoring of Land Subsidence and Ground Fissure Activity within the Su-Xi-Chang Area Based on Time-Series InSAR. **Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 903, 14 fev. 2022.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 950-959, 1992.

Zecchin, M.; Accaino, F.; Ceramicola, S.; Civile, D.; Critelli, S.; Da Lio, C.; Mangano, G.; Prosser, G.; Teatini, P.; Tosi, L. The Crotona Megalandslide, southern Italy: Architecture, timing and tectonic control. **Sci. Rep.** 2018, 8, 1–11.

ZERBINI, S.; RICHTER, B.; ROCCA, F.; VAN DAM, T.; MATONTI, F. A combination of space and terrestrial geodetic techniques to monitor land subsidence: case study, the Southeastern Po Plain, Italy. **J. Geophys. Res.: Solid Earth** 112 (B5). 2007.

ZHAO, Q.; LIN, H.; JIANG, L.; CHEN, F.; CHENG, S. A study of ground deformation in the Guangzhou urban area with persistent scatterer interferometry. **Sensors** 9 (1), 503–518. 2009.

ZHOU, X.; CHANG, N. B.; LI, S. Applications of SAR interferometry in Earth and environment science research. **Sensors**, v. 9, p. 1876-1912, 2009.

ZHOU, Z. *et al.* InSAR Time Series Analysis of L-Band Data for Understanding Tropical Peatland Degradation and Restoration. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, p. 2592, 5 nov. 2019.