



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Leonardo Augusto Barbosa Lemos

**POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO USO DA TÉCNICA INSAR PARA
AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO DE TALUDE EM FAIXA DE DUTOS EM
ÁREA DE VEGETAÇÃO**

Rio de Janeiro

2025



UFRJ

LEONARDO AUGUSTO BARBOSA LEMOS

**POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO USO DA TÉCNICA INSAR PARA
AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO DE TALUDE EM FAIXA DE DUTOS EM ÁREA
DE VEGETAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadores:

Marcos Barreto de Mendonça
Wagner Nahas Ribeiro

Rio de Janeiro

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Lemos, Leonardo Augusto Barbosa.

Potencialidades e Limitações do Uso da Técnica InSAR para Avaliação do Monitoramento de Talude em Faixa de Dutos em Área de Vegetação / Leonardo Augusto Barbosa Lemos - 2025.
154 f. : 94 il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica & Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2025

Orientador: Prof. Dr. Marcos Barreto de Mendonça e Prof Dr. Wagner Nahas Ribeiro

1. Sensoriamento remoto; 2. Interferometria; 3. Radar de abertura sintética; 4. Movimentos de massa. I. Mendonça, Marcos Barreto de e Ribeiro, Wagner Nahas. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química.



UFRJ

**POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO USO DA TÉCNICA INSAR PARA
AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO DE TALUDE EM FAIXA DE DUTOS EM
ÁREA DE VEGETAÇÃO**

Leonardo Augusto Barbosa Lemos

Orientadores:

Marcos Barreto de Mendonça
Wagner Nahas Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente. Prof. Marcos Barreto de Mendonça, D.Sc., UFRJ

Prof. Wagner Nahas Ribeiro, D.Sc., UFRJ

Prof. Leandro Torres Di Gregorio, D.Sc., UFRJ

Prof. Daniel Luís Andrade e Silva, D.Sc., IME

Prof. Wendson de Oliveira Souza, D.Sc., UFPI

Rio de Janeiro

2025

DEDICATÓRIA

À minha querida mãe, em memória, por todo incentivo, dedicação e amor.
À minha família, Adriana e Guilherme, por toda paciência e compreensão nesta fase da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor D.Sc. Marcos Barreto de Mendonça por ter proposto tema tão importante e desafiador.

Ao Professor D.Sc. Wagner Nahas Ribeiro por todo o apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

A todos os colegas da UFRJ que tive o prazer de conhecer durante a minha caminhada feita até aqui.

À Petrobras pelo incentivo ao desenvolvimento acadêmico de seus funcionários.

À equipe de desenvolvimento do *software* SARproZ pela disponibilização de uma licença teste do programa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de queda rochosa	25
Figura 2 - Exemplo de queda rochosa	25
Figura 3 - Esquema de tombamento.....	26
Figura 4 - Exemplo de tombamento.....	27
Figura 5 - Esquema de escorregamento rotacional.....	28
Figura 6 - Fotografia de um escorregamento rotacional ocorrido na Nova Zelândia	28
Figura 7 - Esquema de escorregamento translacional.....	29
Figura 8 - Imagem de um escorregamento translacional que ocorreu em 2001 no Vale do Rio Beatton, <i>British Columbia</i> , Canada.....	30
Figura 9 - Esquema de espalhamento lateral	31
Figura 10 - Fotografia de um espalhamento lateral ocorrido em uma rodovia, como resultado do terremoto Loma Prieta, em 1989, na Califórnia, EUA	31
Figura 11 - Esquema de fluxo de terra.....	32
Figura 12 - Fluxo de terra de Lemieux, 1993	33
Figura 13 - Esquema de fluxo de detritos.....	33
Figura 14 - Danos causados por um fluxo de detritos na cidade de Caraballeda, na base da Cordilheira de La Costan, no litoral norte da Venezuela.....	34
Figura 15 - Esquema de rastejo	35
Figura 16 - A imagem mostra os efeitos do rastejo, em uma área próxima a <i>East Sussex</i> , no Reino Unido, chamada <i>Chalk Grasslands</i>	35
Figura 17 - Partes de um deslizamento de terra (adaptado de Varnes, 1978).....	38
Figura 18 - Faixa do duto enterrado OSPLAN em Guararema, SP	42
Figura 19 - Dutos e Terminais no Brasil	44
Figura 20 - Traçado do Gasoduto Bolívia-Brasil	45
Figura 21 - Localização da Serra do Mar	46
Figura 22 - Localização da Serra Geral.....	46
Figura 23 - Faixa de imageamento para análise DInSAR na faixa do ORBIG	51
Figura 24 - Instalação de cones refletivos	51
Figura 25 - Densidade de espalhadores persistentes (PS) nas proximidades da área de interesse	52

Figura 26 - Resultados dos deslocamentos na direção da linha de visada para estudo feito na faixa do ORBIG	53
Figura 27 - Elementos de ondas	55
Figura 28 - Representação esquemática da fase em ondas senoidais num intervalo de tempo $t=0$	55
Figura 29 - Comprimento e frequência de ondas no espectro eletromagnético.....	56
Figura 30 - Representação das polarizações horizontal e vertical	57
Figura 31 - Princípio do Radar de Abertura Sintética (SAR)	58
Figura 32 - (a) Visão em perspectiva da geometria de imageamento do radar imageador, (b) visão lateral, (c) visão frontal. Os parâmetros Δx e Δy referem-se a variações na direção radial projetada e azimutal, respectivamente.....	60
Figura 33 - Modos de Imageamento SAR.....	61
Figura 34 - Geometria de imageamento orbital ascendente (à esquerda) e descendente (à direita).....	61
Figura 35 - Exemplo de interferograma do Monte Etna, sul da Itália.....	63
Figura 36 - Representação geométrica do posicionamento de um ponto P na superfície imageada em tempos distintos	64
Figura 37 - Modos de aquisição do par interferométrico: (a) uma passagem; (b) duas passagens.....	65
Figura 38 - Geometria do imageamento InSAR.....	66
Figura 39 - Exemplo simplificado de uma interferometria SAR ilustrando uma deformação do terreno ocorrida entre duas passagens de satélite	67
Figura 40 - Interferometria SAR ilustrando uma deformação do terreno (d) ocorrida entre a primeira (S1) e segunda (S2) aquisição de imagens.....	68
Figura 41 - Corregistro de Imagens.....	70
Figura 42 - Imagens de coerência interferométrica da região de <i>Groningen</i> , norte da Holanda	72
Figura 43 - Correção da terra plana para uma situação hipotética	73
Figura 44 - (a) Interferograma com a presença da fase de terra plana e (b) Interferograma com a fase de terra plana removida.....	74
Figura 45 - (a) Ilustração de um interferograma e de (b) seu correspondente com a fase desdobrada	76

Figura 46 - Ilustração do comportamento da fase para (a) pixel com espalhadores distribuídos e (b) pixel com espalhadores coerentes (persistentes)	79
Figura 47 - Representação geométrica da aquisição de duas imagens e de uma pilha de imagens SAR	79
Figura 48 - Exemplo de configuração de interferogramas diferenciais em relação a uma imagem mestre da técnica PSI para 33 imagens do satélite TerraSAR-X coletadas na Província Mineral de Carajás	80
Figura 49 - Diagrama de blocos da técnica SBAS	82
Figura 50 - Fluxograma das etapas principais de processamento da modelagem IPTA	83
Figura 51 - Fluxograma da modelagem de processamento da técnica SqueerSAR™	85
Figura 52 - Fluxograma de etapas de realização da pesquisa	87
Figura 53 - (a) Satélite Sentinel e (b) Constelação Sentinel.....	89
Figura 54 - Configuração dos Diferentes Modos de Aquisição do Sentinel-1	90
Figura 55 - Faixas de Imageamento do Sentinel-1	91
Figura 56 - Área de extensão da imagem SAR.....	92
Figura 57 - (a) Faixas e subfaixas de imageamento da região de interesse do presente estudo	92
Figura 58 - Fluxograma de processamento para geração dos mapas de coerência.....	93
Figura 59 - Exemplo de utilização do operador <i>TOPSAR DEBURST</i>	96
Figura 60 - Exemplo da interface do SARproZ	98
Figura 61 - Exemplo da aplicação do módulo de estimativa APS no SARproZ	99
Figura 62 - Configuração estrela para aplicação da técnica PSI.....	100
Figura 63 - Fluxograma de processamento InSAR no SARproZ	101
Figura 64 - Localização da área de estudo	105
Figura 65 - Cronologia da Movimentação do Talude.....	107
Figura 66 - Levantamento planialtimétrico realizado na área em junho de 2020 após a constatação da instabilidade. Indicação da movimentação em vermelho	108
Figura 67 - Locação das sondagens a percussão e mistas realizadas na área.....	109
Figura 68 - Perfil geotécnico da área de estudo	110
Figura 69 - Mapa do compartimento sul da Bacia do Recôncavo	111
Figura 70 - Seção geotécnica aproximada no eixo coincidente com a direção da movimentação da massa instável	112

Figura 71 - Análise de estabilidade considerando a configuração atual da seção de estudo .	113
Figura 72 - Análise de estabilidade considerando a provável configuração da seção de estudo antes dos últimos movimentos da massa instável	113
Figura 73 - Análise da estabilidade da seção de estudo com o nível d'água rebaixado 3m...	114
Figura 74 - Pontos para avaliação da coerência interferométrica, com indicação da área em rastejo (retângulo tracejado)	117
Figura 75 - Resultado matricial da coerência no período de Jun/2019 a Jun/2020	120
Figura 76 - Gráfico das linhas de base temporal e espacial para a pilha de imagens. Marcada em vermelho a imagem mestre selecionada.....	122
Figura 77 - Área selecionada para processamento. Ao centro localização do talude em estudo	123
Figura 78 - Imagens coregistradas (a) imagem mestre, (b) exemplo de imagem escrava.....	123
Figura 79 - Primeiros candidatos a espalhadores persistentes selecionados para a área de processamento com indicação do ponto de referência em vermelho.....	124
Figura 80 - Mapa com a medida de coerência para a área de estudo. Área de Interesse em destaque	125
Figura 81 - (a) Região onde foram selecionados os pontos PS para análise da coerência. (b) Gráfico comparativo das medidas de coerência obtidas pela técnica PSI e pela técnica DInSAR clássica	126
Figura 82 - Quantidade de pontos PS por valor de coerência.....	127
Figura 83 - Mapa de deslocamentos em mm. Talude de estudo em destaque.....	128
Figura 84 - Mapa de velocidade de deslocamento em mm/ano. Talude de estudo em destaque	128
Figura 85 - Medidas de deslocamento e velocidade da Área de Interesse	129
Figura 86 - Localização dos pontos no talude.....	130
Figura 87 - (a) Superfície formada pelos deslocamentos acumulados; (b) Superfície formada pelo levantamento topográfico sobreposto.....	131
Figura 88 - Seções transversais e longitudinais selecionadas para análise. As setas indicam o sentido da construção dos perfis transversais (da esquerda para direita)	132
Figura 89 - Perfis longitudinais das seções pré-selecionadas	133
Figura 90 - Exemplo de perfil do deslizamento localizado na Estrada Santo Amaro, formação geológica de Candeias	134

Figura 91 - Perfil SL-02 e comparativo entre os perfis de terreno, destaques indicados em vermelho.....	134
Figura 92 - Perfis transversais das seções pré-selecionadas e séries temporais de deslocamentos (mm) para cada ponto PS e sua respectiva velocidade (mm/ano).....	136
Figura 93 - Mapa de deslocamentos (mm) e registros fotográficos da movimentação do talude.	138
Figura 94 - Vista do desalinhamento e rotação dos suportes	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pares interferométricos selecionados para análise.....	95
Tabela 2 - Composição de pares interferométricos e linhas de base perpendicular e temporal	116
Tabela 3 - Estimativa de coerência para os pares interferométricos de 2019. Em cor verde coerências acima de 0,50.....	118
Tabela 4 - Estimativa de coerência para os pares interferométricos de 2020. Em destaque coerências acima de 0,50.....	119
Tabela 5 - Medidas aproximadas de deslocamento e velocidade para locais do talude	130

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa.....	22
Quadro 2 - Classificação dos movimentos de massa.....	23
Quadro 3 - Velocidade de corridas de massa	24
Quadro 4 - Classificação proposta por Hungr et al. (2014).....	36
Quadro 5 - Principais desastres associados a movimento de massa na história do Brasil.....	40
Quadro 6 - Principais tipos de instrumentos utilizados em monitoramento de taludes.....	48
Quadro 7 - Relação entre coerência e qualidade do interferograma	71
Quadro 8 - Parâmetros dos modos de aquisição da missão Sentinel-1	90

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
	<i>Advanced-Differential Interferometry Synthetic Aperture</i>
A-DInSAR	<i>Radar</i>
ASF	<i>Alaska Satellite Facility</i>
AI	Área de interesse
CCRS	<i>Canada Center For Remote Sensing</i>
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
DInSAR	<i>Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
DS	<i>Distributed Scatterer</i>
InSAR	Interferometria por radar de abertura sintética
ESD	Diversidade Espectral Aprimorada
ESA	<i>European Space Agency</i>
EW	<i>Extra-Wide Swath Mode</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPTA	<i>Interferometric Point Target Analysis</i>
IW	<i>Interferometric Wide Swath Mode</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
MDE	Modelo digital de elevação
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PS	<i>Persistent Scatterers</i>
PSI	<i>Persistent Scatterer Interferometry</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RAR	Radares de Abertura Real
SBAS	<i>Small Baseline Subset</i>
SNAP	<i>Sentinel Application Platform</i>
SLC	<i>Single-Look Complex</i>
SM	<i>Stripmap Mode</i>
SAR	Radar de abertura sintética
TBG	Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil SA
UNISDR	<i>United Nations International Strategy for Disaster Reduction</i>
WV	<i>Wave Mode</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	MOVIMENTOS DE MASSA	21
2.1.1	TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	24
2.1.2	PARTES DE UM DESLIZAMENTO	38
2.1.3	DESASTRES ASSOCIADOS A MOVIMENTOS DE MASSA	39
2.2	SISTEMAS DUTOVIÁRIOS	42
2.2.1	CONCEITOS GERAIS E CARACTERÍSTICAS	42
2.2.2	O TRANSPORTE DUTOVIÁRIO NO BRASIL.....	44
2.2.3	MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE TALUDES E O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO EM FAIXAS DE DUTOS	47
2.3	VISÃO GERAL DO SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR	54
2.3.1	SISTEMA SAR.....	54
2.3.2	FORMAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA IMAGEM SAR.....	59
2.3.3	INTERFEROMETRIA SAR (INSAR)	62
2.3.3	INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR (DINSAR)	66
2.3.4	PROCESSAMENTO INSAR	69
2.3.5	TÉCNICAS AVANÇADAS DINSAR (A-DINSAR).....	77
3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	87
3.1	APLICAÇÃO DA TÉCNICA DINSAR CLÁSSICA.....	88
3.1.1	OBTENÇÃO DAS IMAGENS SAR	88
3.1.2	O PROCESSAMENTO DINSAR	93
3.2	APLICAÇÃO DA TÉCNICA PSI (A-DINSAR).....	97
3.2.1	O <i>SOFTWARE</i> SARPROZ	98
3.2.1	ETAPAS DO PROCESSAMENTO PSI.....	99
4	ÁREA DE ESTUDO	105
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	105

4.2	HISTÓRICO DA INSTABILIDADE.....	106
4.3	LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	108
4.4	INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.....	109
4.5	RETROANÁLISE DA INSTABILIDADE	110
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	115
5.1	TÉCNICA DINSAR CLÁSSICA	115
5.1.1	GERAÇÃO DOS PARES INTERFEROMÉTRICOS	115
5.1.2	ESTIMATIVA DE COERÊNCIA	117
5.2	TÉCNICA DOS ESPALHADORES PERSISTENTES (<i>PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY, PSI</i>).....	122
5.2.1	PREPARAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	122
5.2.2	ESTIMATIVA DA FASE DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA	124
5.2.3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE COERÊNCIA.....	125
5.2.4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS	127
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	141
7	REFERÊNCIAS.....	143

RESUMO

LEMOS, Leonardo Augusto Barbosa. Potencialidades e Limitações do Uso da Técnica InSAR para Avaliação do Monitoramento de Talude em Faixa de Dutos em Área de Vegetação. Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

No Brasil, dutos são parte importante do transporte de petróleo, gás e derivados. Uma parcela significativa destas estruturas passa por terrenos acidentados nas mais diversas unidades geomorfológicas e estão suscetíveis a movimentos de massa. O monitoramento geotécnico de taludes ao longo da faixa de dutos é extremamente importante para uma avaliação contínua da segurança e tomada de decisão sobre ações de redução de riscos. O objetivo do trabalho é avaliar o uso da interferometria por radar de abertura sintética (InSAR) como ferramenta complementar aos métodos convencionais de monitoramento geotécnico. A análise foi conduzida em um talude submetido a movimentos de massa lentos (rastejo), situado em uma faixa de dutos no estado da Bahia. A aplicação da tecnologia InSAR envolveu duas abordagens. Inicialmente, empregou-se a técnica de interferometria diferencial clássica (DInSAR) para identificar deslocamentos superficiais a partir de pares de imagens SAR. Em seguida, utilizou-se a técnica avançada (A-DInSAR) que empregou espalhadores persistentes interferométricos (PSI: *Persistent Scatterer Interferometry*) na detecção de alvos estáveis ao longo do tempo. Para isso, utilizaram-se 20 imagens SAR do Sentinel-1. Os resultados DInSAR indicaram limitações em função da baixa coerência interferométrica na área de estudo por causa da vegetação, o que comprometeu a confiabilidade dos resultados. Como alternativa, a técnica PSI permitiu identificar deslocamentos com maior precisão. No entanto, a baixa densidade de espalhadores persistentes em alguns trechos limitou a cobertura espacial das medições – e pode representar uma restrição a aplicação. A técnica InSAR revelou limitações em áreas com cobertura vegetal, em especial devido à descorrelação temporal e escassez de alvos coerentes. A opção da análise integrada com dados de levantamento topográfico e inspeção geotécnica, possibilitou a aplicação em contextos geotécnicos. A correspondência entre os deslocamentos detectados remotamente e as observações em campo confirmou os resultados obtidos. Mesmo em ambientes com restrições naturais, a técnica apresentou capacidade para contribuir no monitoramento de taludes e consolida-se como uma ferramenta complementar em estudo de estabilidade e gestão de riscos.

PALAVRAS-CHAVE: SENSORIAMENTO REMOTO, INTERFEROMETRIA, RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA, MOVIMENTOS DE MASSA.

ABSTRACT

LEMOS, Leonardo Augusto Barbosa. **Potentialities and Limitations of Using the InSAR Technique to Evaluate Slope Monitoring in Pipeline Areas in Vegetated Areas**. Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

In Brazil, pipes are an important part of oil, gas and derivatives transportation. A significant portion of these structures pass through rugged terrain in the most diverse geomorphological sites and are susceptible to mass movements. Geotechnical monitoring of slopes along pipelines is crucial for continuous safety assessment and decision-making regarding risk reduction measures. The objective of this study is to evaluate the use of synthetic aperture radar interferometry (InSAR) as a complementary tool to conventional geotechnical monitoring methods. The analysis was conducted on a slope subject to slow mass movements (creeping), located in a pipeline in the state of Bahia. The application of InSAR technology involved two approaches. Initially, the classical differential interferometry (DInSAR) technique was used to identify surface displacements from pairs of SAR images. Next, the advanced technique (A-DInSAR) was used, employing persistent scatterer interferometry (PSI) to detect targets that are stable over time. Twenty Sentinel-1 SAR images were used for this purpose. The DInSAR results indicated limitations due to the low interferometric coherence in the study area due to vegetation, which compromised the reliability of the results. Alternatively, the PSI technique allowed for more accurate identification of displacements. However, the low density of persistent scatterers in some sections limited the spatial coverage of the measurements and may represent a limitation for its application. The InSAR technique revealed limitations in areas with vegetation cover, particularly due to temporal decorrelation and a scarcity of coherent targets. The option of integrating analysis with topographic survey and geotechnical inspection data enabled its application in geotechnical contexts. The correspondence between remotely detected displacements and field observations confirmed the results obtained. Even in environments with natural restrictions, the technique has demonstrated the capacity to contribute to slope monitoring and has established itself as a complementary tool in stability studies and risk management.

KEYWORDS: REMOTE SENSING, INTERFEROMETRY, SYNTHETIC APERTURE RADAR, MASS MOVEMENTS

1 INTRODUÇÃO

Faixa de dutos é uma área de terreno destinada à implantação e operação de sistemas de tubulações projetadas para o transporte de fluidos como petróleo, gás natural, água e substâncias químicas. Esses dutos são, em sua maioria, instalados no subsolo.

As faixas de dutos são projetadas para garantir a segurança e a eficiência no transporte desses fluidos ao longo de longas distâncias. Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP), o Brasil possui mais de 15 mil quilômetros de oleodutos e gasodutos (Transpetro 2024).

Atravessando áreas geograficamente diversas, como serras, rios, ambientes marinhos costeiros e regiões metropolitanas, muitos trechos destas instalações encontram-se em terrenos suscetíveis a escorregamentos, abatimentos e outros fenômenos de origem geotécnica. Além disso, a heterogeneidade das características geológicas e geomorfológicas observadas nessas áreas acarreta uma significativa variação nos tipos de solos e nas condições hidrogeológicas, o que demanda o desenvolvimento de soluções de engenharia específicas e adequadas às particularidades locais, especialmente no que se refere às atividades de escavação, dimensionamento de fundações e técnicas de estabilização de taludes.

Estradas, linhas de transmissão, gasodutos, oleodutos, etc, bem como outros tipos de obras lineares, podem ser ameaçadas por eventos naturais adversos como deslizamentos (termo usado no presente trabalho para designar os movimentos de massa em encosta), inundações, erosões, terremotos, furacões, maremotos etc. Os desastres associados a movimentos de massa podem resultar em impactos ambientais significativos, expressivos prejuízos econômicos, danos sociais relevantes e, em casos mais graves, perdas de vidas humanas. No contexto dos dutos de transmissão — como oleodutos, gasodutos, polidutos e aquedutos —, as falhas provocadas por fenômenos naturais ocorrem com menor frequência em comparação àquelas originadas por processos de corrosão ou interferências de terceiros. Ainda assim, merecem atenção especial, uma vez que deslizamentos podem ocorrer em áreas de difícil acesso, o que compromete a eficácia das ações emergenciais de contenção de vazamentos e dificulta a estabilização imediata do maciço geotécnico afetado.

Diversos desastres causados por problemas geotécnicos em dutos, principalmente escorregamentos com rompimento e vazamento, já foram relatados por Piccarelli *et al.* (2004),

Soares e Musman (2001), entre outros. Nestes casos, a preocupação é muito grande devido aos efeitos em cascata associado a exposição de dutos à ameaça de deslizamentos (Girgin *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Ações preventivas são de suma importância para reduzir o perigo associado ao evento geológico adverso, de forma a garantir a integridade das instalações e sua operação segura. Para isto sistemas de alerta são de suma importância para o monitoramento de parâmetros que indicam o grau de segurança quanto a ocorrência de deslizamentos.

Com o objetivo de reduzir riscos geológicos, as operadoras da rede dutoviária empregam sistemas de gerenciamento da integridade dos dutos. Medidas como inspeções regulares, manutenções e planos de comunicação com intuito de prevenir acidentes fazem parte deste sistema de gerenciamento. Uma das técnicas em desenvolvimento que vem sendo utilizada para mapear e monitorar os movimentos de superfície é a técnica denominada de Interferometria Diferencial (DInSAR), a qual utiliza imageamento por radar de abertura sintética (SAR). A técnica possui diversas potencialidades, como a cobertura de grandes áreas, a aquisição regular de imagens, proporcionando uma alta resolução temporal e monitoramento de longo prazo, a possibilidade de se operar em quaisquer condições atmosféricas, dentre outras. Apesar das vantagens apresentadas, o presente trabalho deparou-se com algumas limitações, dentre estas, a principal pode ser considerada a característica da superfície analisada. Sabe-se pela literatura que a presença de vegetação na área analisada pode limitar aplicação da técnica DInSAR clássica. Devido a esta dificuldade, procurou-se a adoção de uma segunda abordagem, utilizando a técnica DInSAR avançada dos espalhadores persistentes (*Persistent Scatterer Interferometry*, PSI) com a finalidade de superar as limitações impostas pela área vegetada.

1.1 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho se justifica pela investigação da aplicação de uma tecnologia relativamente nova como o DInSAR no monitoramento de taludes ao longo de obras lineares, sendo esperadas contribuições decorrentes de sua utilização. Por suas características essencialmente remotas, a utilização da tecnologia DInSAR pode acarretar um melhor direcionamento de recursos humanos nas atividades de monitoramento de faixas de dutos,

viabilizando o diagnóstico e acompanhamento de inspeção externa de dutos, contribuindo para identificação de elementos que possam representar risco para estes.

A utilização de dados e de ferramentas de processamento gratuitas, como o *software* SNAP, proporcionam uma facilidade adicional na aplicação da técnica. Mesmo que em parte do presente trabalho tenha sido utilizado o *software* de processamento comercial SARproZ, existem outras possibilidades de utilização de ferramentas gratuitas desenvolvidas por universidades.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Partindo da hipótese da técnica DInSAR se revelar adequada para a detecção de movimentações na superfície terrestre, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o uso da interferometria por radar de abertura sintética (InSAR) como ferramenta complementar aos métodos convencionais de monitoramento geotécnico em áreas com vegetação.

Objetivos Específicos

- Detectar movimentação de massa em talude;
- Analisar potencialidades e limitações da técnica InSAR; e
- Validar os resultados de deslocamentos via métodos de observação de campo.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, sendo o capítulo inicial uma introdução ao estudo, descrevendo-se a problemática que será analisada, os objetivos propostos e a justificativa da pesquisa realizada.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos fenômenos geológicos dos movimentos de massa com suas classificações e tipologias. Foram abordadas as classificações e definições propostas por Varnes (1978) e suas atualizações (Cruden e Varnes, 1996). Também foram abordados neste Capítulo o conceito dos desastres associados a movimentos de massa e um breve histórico dos principais desastres ocorridos no Brasil. Também são abordados os conceitos gerais e características dos sistemas dutoviários, os desastres

associados a movimentos de massa nestas estruturas e o uso do sensoriamento remoto para monitoramento de faixas de dutos. Finalmente, é tratada a tecnologia InSAR, desde o funcionamento mais elementar de um sistema de radar até as técnicas mais avançadas da interferometria diferencial. São apresentados neste Capítulo o sistema SAR e suas particularidades, bem como suas técnicas correlatas, como a própria interferometria SAR (InSAR) e a interferometria diferencial SAR (DInSAR), e sua importante finalidade de medir variações na superfície terrestre. Complementarmente são abordadas algumas técnicas avançadas DInSAR (A-DInSAR) que podem superar algumas limitações da técnica DInSAR clássica.

O Capítulo 3 expõe a metodologia utilizada para aplicação das técnicas DInSAR clássica e da técnica PSI à área de estudo. Desde a aquisição de imagens Sentinel-1 e as características deste programa da Agência Espacial Europeia (ESA), até as etapas de processamento, tanto da técnica DInSAR clássica, como da técnica PSI

O Capítulo 4 traz uma descrição detalhada da área estudada, mostrando o histórico da instabilidade e as características geotécnicas do fenômeno de rastejo no talude analisado.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no estudo e sua análise.

O sexto Capítulo descreve as conclusões obtidas a partir dos resultados encontrados e as sugestões para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir são descritos os temas importantes relacionados ao este trabalho, dentre os quais estão: conceitos e classificação dos movimentos de massa, características gerais dos sistemas dutoviários e uma visão geral do sensoriamento remoto por radar.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Pode-se encontrar na literatura várias discussões sobre os termos movimentos de massa e deslizamentos. Vanacôr (2006) apresenta exemplos de alguns autores e suas definições de movimentos de massa, como a definição feita por Sharpe (1938), onde o deslizamento pode ser definido como a queda perceptível ou movimento descendente de uma massa relativamente seca de solo, rocha ou ambas, ou ainda a definição de Selby (1993) que classifica um movimento de massa como o movimento de solo ou material rochoso encosta abaixo sob influência da gravidade, sendo que a água, ar ou gelo não contribuem diretamente para o fenômeno, mas podem estar presentes nestes, pois podem reduzir a resistência dos materiais, alterando a plasticidade e fluidez dos solos. Por fim Cruden (1991) utiliza o termo genérico escorregamentos, que engloba uma variedade de tipos de movimentos de massa, para caracterizar o deslocamento de material rochoso, detritos ou solo.

Devido à sua vasta extensão territorial e diversidade geográfica, no Brasil estes fenômenos são frequentes e muitas vezes de proporções catastróficas. Estes eventos, regularmente são desencadeados por fatores naturais como fortes chuvas, topografia acidentada e solos susceptíveis.

Vargas (1999) fez um relato histórico-conceitual dos deslizamentos no Brasil ocorridos desde 1939 na Serra do Mar, onde foram realizadas diversas obras de engenharia.

Segundo Suzuki (2004), o primeiro caso de movimento de massa bem documentado foi o escorregamento de talus ocorrido na Serra de Cubatão, em 1939, atrás da Usina Hidroelétrica da Light.

Uma abordagem amplamente reconhecida para categorizar e descrever os diferentes tipos de movimentos de massa foi desenvolvida pelo geólogo norueguês Varnes (1978).

A classificação de Varnes (1978), é um sistema abrangente para categorizar os movimentos de massa, classificando-os em diversos tipos, levando em conta fatores como o material envolvido, velocidade de movimento e mecanismo desencadeador.

Esta classificação sofreu uma atualização em 1996 (Cruden e Varnes, 1996) com o objetivo de alterar e acrescentar alguns termos e subcategorias sendo uma evolução da classificação original. A principal diferença entre essas duas classificações reside no maior detalhamento e refinamento com relação à versão de 1978, buscando fornecer uma descrição mais completa e precisa do fenômeno. Essas melhorias na classificação de 1996 refletem um avanço na compreensão dos processos de movimentos de massa, permitindo uma análise mais precisa e uma gestão mais eficaz dos riscos geológicos.

Cruden e Varnes (1996) procuram categorizar os movimentos de massa, com base em duas características principais: o tipo de material que se move e o tipo de movimento que ocorre. Indicaram também que qualquer movimento de massa pode ser classificado e descrito com dois substantivos, o primeiro descrevendo o material e o segundo descrevendo o tipo de movimento. Esta classificação é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa

Tipo de movimento			Tipos de Material		
			Rocha	Solos (engenharia)	
Quedas (fall)				Predominantemente Grosso	Predominantemente Fino
Tombamento (topple)			Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de solo
Escorregamento (slide)	Rotacional	Poucas unidades	Escorregamento em rocha	Escorregamento de detritos	Escorregamento em solo
	Translacional	Muitas unidades			
Espalhamentos			Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos	Espalhamento de solo
Corridas (flow)			Corrida de rocha	Corrida de detritos	Corrida de lama
Complexo (complex)			Combinação de dois ou mais tipos principais de movimento		

Fonte: Adaptado de Varnes (1978)

Além disso, a atualização de 1996, descreve nomes mais elaborados quando informações sobre o movimento se tornaram disponíveis. Desta forma, para construir a identificação completa do movimento, foram adicionados identificadores antes da classificação de dois substantivos usando uma sequência preferencial de termos. A sequência sugerida proporciona um estreitamento progressivo do foco dos identificadores, primeiro por tempo e depois por localização espacial, começando com uma visão de todo o deslizamento, continuando com partes do movimento e, finalmente, definindo os materiais envolvidos. A sequência recomendada é apresentada no Quadro 2, onde é descrita a atividade (incluindo estado, distribuição e estilo) seguida por descrições de todos os movimentos (incluindo velocidade, umidade, material e tipo).

Quadro 2 - Classificação dos movimentos de massa

Glossário para formação de nomes para deslizamentos			
Atividade			
Estado	Distribuição	Estilo	
Ativo	Avançado	Complexo	
Reativado	Retroregressivo	Composto	
Suspenso	Alargamento	Múltiplo	
Inativo	Ampliado	Sucessivo	
Adormecido	Confinado		
Abandonado	Diminuindo		
Estabilizado	Movendo		
Remanescente			
Descrição do Primeiro Movimento			
Taxa	Teor de umidade	Material	Tipo
Extremamente rápido	Seco	Rocha	Queda
Muito rápido	Úmido	Solo	Tombamento
Rápido	Saturado	Terra	Escorregamento
Moderado	Muito saturado	Detritos	Espalhamento
Lento			Corrida
Muito lento			
Extremamente lento			
Descrição do Segundo Movimento			
Taxa	Teor de umidade	Material	Tipo
Extremamente rápido	Seco	Rocha	Queda
Muito rápido	Úmido	Solo	Tombamento
Rápido	Saturado	Terra	Escorregamento
Moderado	Muito saturado	Detritos	Espalhamento
Lento			Corrida
Muito lento			

Fonte: Adaptada de Cruden e Varnes (1996)

A Sociedade Internacional de Geotecnia da UNESCO (WP/WLI, 1995) e Cruden e Varnes (1996) apresentam uma escala de velocidades para as corridas de massa. Esta escala está apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 - Velocidade de corridas de massa

Descrição	Velocidade (mm/s)	Velocidade típica
Extremamente rápido	5×10^3	5 m/s
Muito rápido	5×10^1	3 m/min
Rápido	5×10^{-1}	1,8 m/h
Moderado	5×10^{-3}	13 m/mês
Devagar	5×10^{-5}	1,6 m/ano
Muito devagar	5×10^{-7}	16 mm/ano
Extremamente devagar		

Fonte: Adaptado de WP/WLI (1995)

2.1.1 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Conforme citado no início do Capítulo, Cruden e Varnes (1996) criaram uma classificação para os tipos de movimento de massa. Aqui tem-se a intenção de detalhar as definições propostas por Cruden e Varnes (1996), com o objetivo de proporcionar um melhor entendimento do fenômeno dos movimentos de massa.

a) Quedas

Segundo Highland e Bobrowsky (2008), uma queda se inicia com a separação do solo ou da rocha, ou de ambos, de um talude íngreme, ao longo de sua superfície, na qual tenha ocorrido pouco ou nenhum deslocamento por cisalhamento. Posteriormente, o material vem abaixo, principalmente por queda, salto ou rolamento.

Para Varnes (1978) quedas são movimentos em queda livre de fragmentos rochosos que se desprendem de taludes íngremes.

Podem acontecer em taludes íngremes ou verticais e o volume de material em uma queda pode variar substancialmente, de rochas individuais ou torrões de solo a blocos maciços de milhares de metros cúbicos de volume.

Sua velocidade de deslocamento é muito rápida ou extremamente rápida, sendo a declividade do talude uma condicionante para definição da velocidade.

As Figuras 1 e 2 apresentam um esquema e um exemplo de queda rochosa.

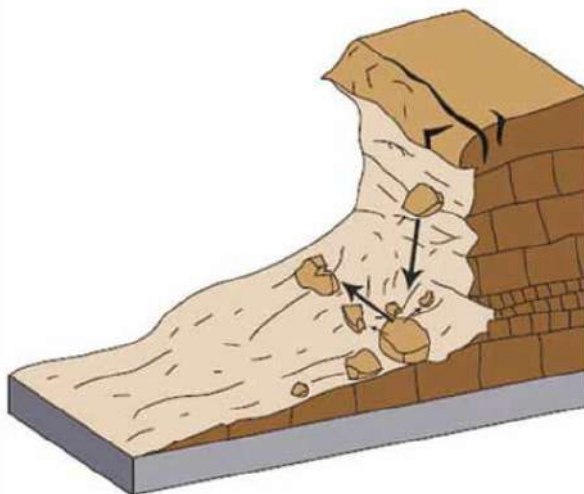


Figura 1 - Esquema de queda rochosa

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)



Figura 2 - Exemplo de queda rochosa

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

b) Tombamentos

O tombamento é definido como o movimento de massa caracterizado pela rotação ou inclinação de blocos de rocha ou camadas de solo em torno de um ponto de pivô ou eixo. Esse ponto de pivô geralmente se localiza na base da massa que está tombando. O movimento pode ser lento ou rápido, dependendo das condições geológicas e das forças envolvidas.

Highland e Bobrowsky (2008) citam que tombamentos podem ser causados pela gravidade exercida sobre o peso do material na parte superior da massa deslocada, podendo conter rochas, detritos ou terra.

Cruden e Varnes (1996) classificam o tombamento em dois tipos principais, tombamento de blocos e tombamento flexural, onde camadas de rocha ou solo se dobram e curvam antes de tombar. Indicam ainda que os mecanismos do movimento podem ser rotacionais ou de inclinação, e que sua dinâmica pode ser lenta ou rápida dependendo das condições ambientais e geológicas.

As figuras 3 e 4 apresentam um esquema e um exemplo de tombamento.

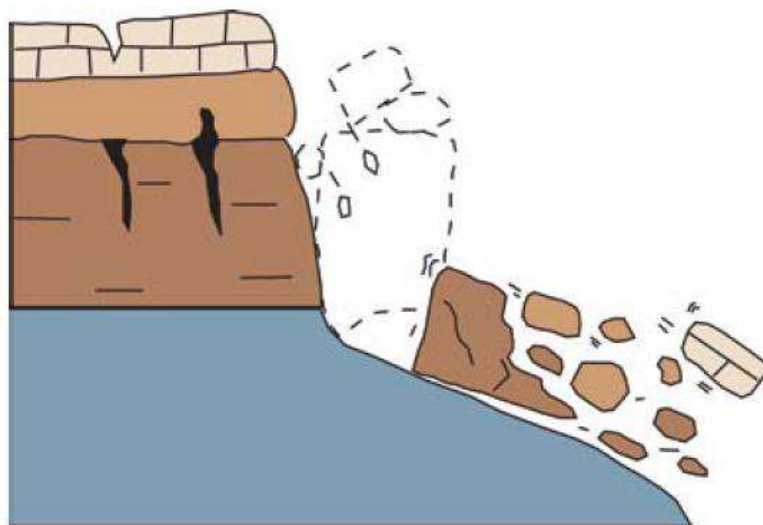


Figura 3 - Esquema de tombamento

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)



Figura 4 - Exemplo de tombamento

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

c) Escorregamentos

Segundo Highland e Bobrowsky (2008) escorregamentos são movimentos de uma massa de solo ou rocha, em declive, que ocorre sobre superfícies em ruptura ou sobre zonas relativamente finas com intensa deformação por cisalhamento. Estes movimentos não ocorrem, inicialmente, de maneira simultânea, por toda área que vem a se tornar a superfície da ruptura; o volume de material deslocado aumenta a partir de uma área no local da ruptura.

Guidicini e Nieble (1984) relatam ainda que são movimentos rápidos, de curta duração, com plano de ruptura e material deslizado bem definido, onde a velocidade do movimento depende da inclinação da superfície de escorregamento, da causa inicial da movimentação e do tipo de terreno.

Segundo Augusto Filho (1992), os escorregamentos podem ser divididos com base na forma do plano de ruptura e pelo tipo de material que instabilizam: solo, rocha, tálus, colúvio e detritos. Assim, podem ser divididos em: rotacionais e translacionais.

Escorregamentos rotacionais (Figuras 5 e 6) são tipos de deslizamento em que a superfície da ruptura é curvada no sentido superior e o movimento da queda de barreira é mais ou menos rotatório em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude. A massa deslocada pode, sob certas circunstâncias, mover-se de maneira relativamente coerente, ao longo da superfície de ruptura e com pouca deformação interna. O topo do material deslocado pode

mover-se quase que verticalmente para baixo e a parte superior desse material pode inclinar-se para trás em direção ao talude.

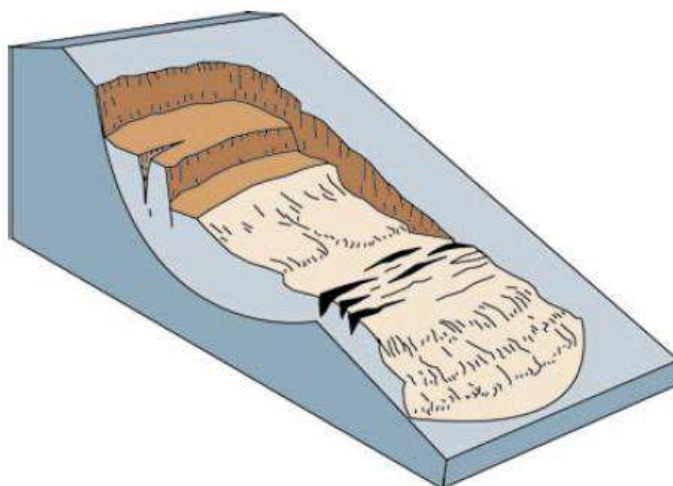


Figura 5 - Esquema de escorregamento rotacional

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)



Figura 6 - Fotografia de um escorregamento rotacional ocorrido na Nova Zelândia

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

Os escorregamentos translacionais (Figuras 7 e 8) apresentam superfície de ruptura em forma planar ou levemente ondulada, com massa deslizante rasa, maior extensão no comprimento. Geralmente acompanham feições geológicas (foliação, xistosidade, fraturas, falhas, etc.) e hidrológicas já existentes no material. São muito frequentes nas regiões serranas brasileiras, ocorrendo, em geral, em solos pouco desenvolvidos, com altas declividades, no contato entre os solos superficiais ou saprolíticos e rocha, alterada ou não (Varnes, 1978; ; Infanti Junior e Fornasari Filho, 1998; Fernandes e Amaral, 2003). Estão associados aos escorregamentos da Serra do Mar, caracterizados por horizontes coluvionares superficiais e saprolíticos (residuais), com espessuras de 1m até poucos metros, e associados ao tipo de litologia, mecanismo de instabilização, condição de fluxos de água, resistência dos solos e perfil de permeabilidade (Wolle e Carvalho, 1994).

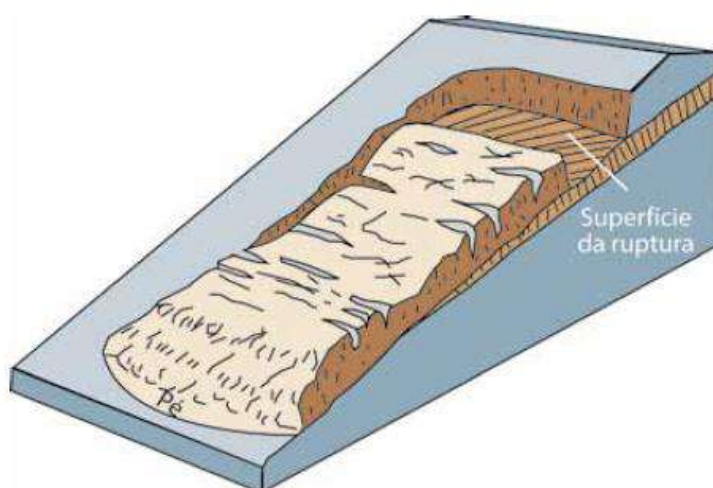


Figura 7 - Esquema de escorregamento translacional

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)



Figura 8 - Imagem de um escorregamento translacional que ocorreu em 2001 no Vale do Rio Beaton, *British Columbia*, Canada

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

d) Espalhamento

Segundo Cruden e Varnes. (1996), o espalhamento (ou "*spread*") é caracterizado por uma extensão lateral e um deslocamento diferencial de blocos de rocha ou solo. Pode ser definido ainda como um tipo de movimento de massa caracterizado pela extensão lateral e desintegração de uma massa de material, onde blocos individuais se movem diferencialmente uns em relação aos outros. Este tipo de movimento de massa ocorre geralmente em solos e rochas que são inicialmente contínuos, mas que se fragmentam e se espalham devido a tensões internas e condições geomorfológicas. Highland e Bobrowsky (2008) indicam que os espalhamentos podem ser o resultado de liquefação ou fluxo (extrusão) do material menos rígido e que podem ser do tipo em blocos, por liquefação e laterais.

Os espalhamentos possuem como características principais a sua extensão lateral, onde a massa de solo ou rocha se estende horizontalmente e o seu deslocamento diferencial, onde blocos individuais dentro da massa de material se movem de maneira desigual, causando deslocamentos diferenciais.

Usualmente os espalhamentos ocorrem em solos argilosos, sedimentos saturados ou rochas fortemente fraturadas. A presença de água pode desempenhar um papel significativo, diminuindo a coesão do material e facilitando o espalhamento.

As figuras 9 e 10 apresentam um esquema e um exemplo de espalhamento.

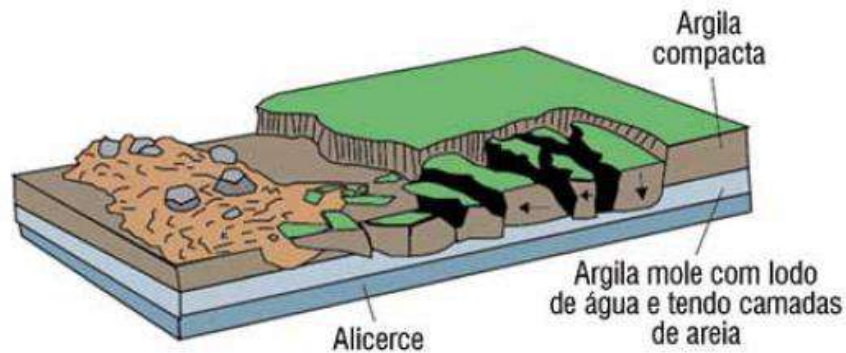


Figura 9 - Esquema de espalhamento lateral

Uma camada passível de liquefação está abaixo da camada superficial

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)



Figura 10 - Fotografia de um espalhamento lateral ocorrido em uma rodovia, como resultado do terremoto Loma Prieta, em 1989, na Califórnia, EUA

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

e) Corridas ou fluxo de massa

Segundo Infanti Junior e Fornasari Filho (1998), fluxos de massa ou corridas são movimentos gravitacionais de grandes dimensões, que se deslocam na forma de escoamento rápido. Possuem características intermediárias entre avalanches de rochas e inundações,

regidas pela mecânica dos solos e dos fluidos. Highland e Bobrowsky (2008) relatam que pode haver com frequência uma mudança gradativa de escorregamentos para escoamentos, dependendo da quantidade de água presente, da mobilidade e da evolução do movimento.

As corridas possuem denominações diferentes de acordo com o tipo de material envolvido, quantidade de água e da velocidade de deslocamento da massa. Elas podem ser classificadas como corridas de lama ou terra (Figuras 11 e 12), nas quais o material predominante é o solo, e corridas de detritos (Figuras 13 e 14) as quais envolvem uma mistura de diversos materiais: solo, fragmentos de rochas e vegetais.

Varnes (1978) define que são movimentos de massa extremamente rápidos e desencadeados por um intenso fluxo de água na superfície, em decorrência de chuvas fortes, que liquefaz o material superficial que escoa encosta abaixo em forma de um material viscoso composto por lama, vegetais e detritos rochosos.

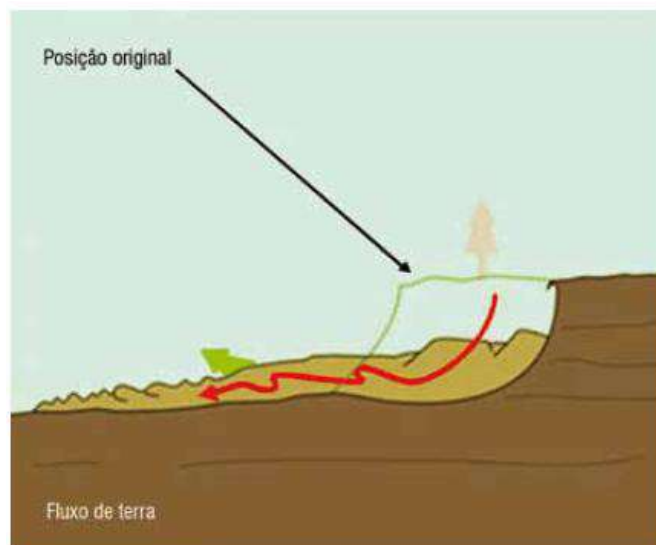


Figura 11 - Esquema de fluxo de terra

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)



Figura 12 - Fluxo de terra de Lemieux, 1993

Um rápido fluxo de terra ocorrido em argila marinha sensível, próximo a Ottawa, Canadá

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

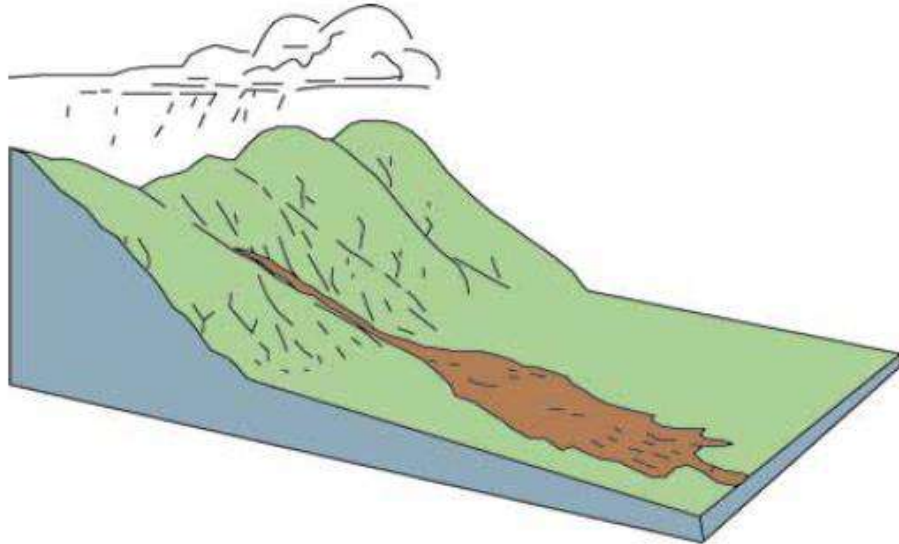


Figura 13 - Esquema de fluxo de detritos

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

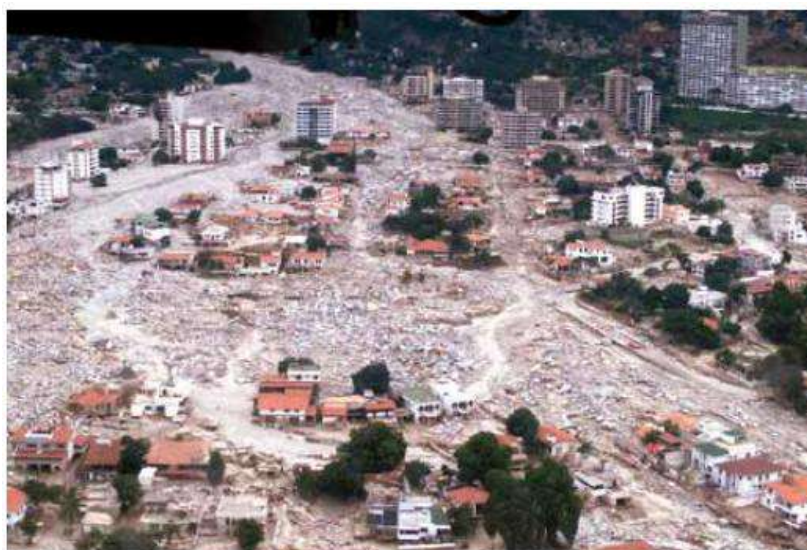


Figura 14 - Danos causados por um fluxo de detritos na cidade de Caraballeda, na base da Cordilheira de La Costan, no litoral norte da Venezuela

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

Há ainda os fluxos do tipo lento, denominados de rastejos (*creep*) (Figuras 15 e 16), que para Highland e Bobrowsky são os fluxos lentos de terra e consistem em um movimento vagaroso, imperceptível e contínuo, para baixo do solo que forma o talude. Esse tipo de deslocamento é causado por tensão de cisalhamento interna suficiente para causar deformação, mas insuficiente para causar rupturas. Guidicini e Nieble (1984) relatam ainda que os rastejos podem englobar grandes massas, sem que haja uma diferenciação clara entre o material em movimento e a região estável. O movimento é provocado pela ação da gravidade, associada a efeitos provocados por variações de temperatura e umidade.

Terzaghi (1950 apud Guidicini e Nieble, 1984) classificou os rastejos em sazonais, sendo o movimento gerado devido às variações de temperatura e umidade nas camadas mais superficiais; e contínuos, em que o movimento ocorre apenas devido à ação da gravidade, abaixo da zona de variação sazonal, atingindo maiores profundidades. Highland e Bobrowsky relacionam ainda os rastejos progressivos, no qual os taludes atingem o ponto de ruptura gerando outros tipos de movimento de massa.

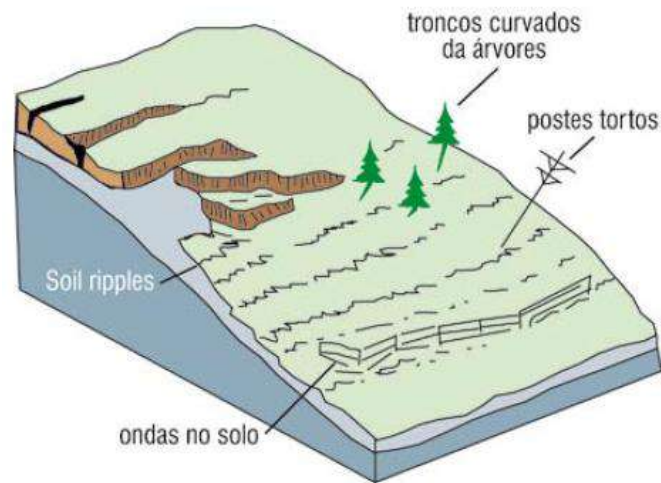


Figura 15 - Esquema de rastejo

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)



Figura 16 - A imagem mostra os efeitos do rastejo, em uma área próxima a *East Sussex*, no Reino Unido, chamada *Chalk Grasslands*

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

Cruden e Varnes (1996) e Highland e Bobrowsky (2008), apresentam outras classificações não usuais no Brasil, como fluxo de detritos vulcânicos, avalanche de detritos e escoamentos em subsolos permanentemente gelados. Estas classificações estão relacionadas principalmente ao tipo de material e as condições de saturação do solo, embora ocorram em contextos ambientais diferentes e tenham origens distintas.

Cruden e Varnes (1996) sugerem um último tipo de movimento de massa, os complexos, que são nada mais que a combinação de dois ou mais tipos principais de movimento.

Hungr *et al.* (2014) elaboraram uma atualização da classificação de movimentos de massa, que teve por objetivo revisar os diversos aspectos da classificação de Varnes (1978) e de conceitos introduzidos por Cruden e Varnes (1996), que ampliaram a classificação original de Varnes (1978), incluindo novos tipos de movimentos de massa e fornecendo uma estrutura mais abrangente para a análise e classificação desses eventos. Hungr *et al.* (2014) recomendam a modificação da definição dos materiais formadores de deslizamentos, para, assim, fornecer compatibilidade com a terminologia geotécnica e geológica, que reflete os avanços recentes na compreensão dos fenômenos de movimento de massa e dos materiais e mecanismos envolvidos. São sugeridas outras modificações menos importantes do sistema de classificação, resultantes de desenvolvimentos recentes da ciência dos escorregamentos. Hungr *et al.* (2014) apresentam 32 tipos de deslizamentos, cada um dos quais é apoiado por sua definição formal.

O ponto central da classificação de Hungr *et al.* (2014) é que os movimentos de massa são processos gravitacionais que se desenvolvem no tempo através de vários estágios, podendo ser condicionados pela ação da água. Hungr *et al.* (2014) observam que muitos movimentos de massa apresentam deformações pré-falha, falha e pós-falha e ainda podem exibir uma série de episódios de movimento separados por longos ou curtos períodos de relativa calma.

O Quadro 4 apresenta um resumo da classificação proposta por Hungr *et al.* (2014)

Quadro 4 - Classificação proposta por Hungr *et al.* (2014)

(continua)

Tipo de Movimento	Rocha	Solo
Queda	Queda de rochas/gelo*	Queda de pedregulho/detrimento/silte*
Tombamento	Tombamento de bloco de rocha*	Tombamento de cascalho/areia/silte*
	Tombamento à flexão de rocha	

Quadro 4 - Classificação proposta por Hungr *et al.* (2014)

(conclusão)

Tipo de Movimento	Rocha	Solo
Escorregamento ou deslizamento	Escorregamento rotacional de rocha	Escorregamento rotacional de argil/silte
	Escorregamento planar de rocha*	Escorregamento planar de argila/silte
	Escorregamento em cunha de rocha*	Escorregamento de pedregulho/areia/detrito*
	Escorregamento de rocha	Escorregamento composto de argila/silte
	Escorregamento irregular de rocha*	
Espalhamento lateral	Espalhamento de talude de rocha	Espalhamento de areia/silte liquefeito
		Espalhamento de argila* sensitiva
Fluxo	Avalanche de rocha/gelo*	Fluxo seco de areia/silte/detrito
		Corrida úmida de areia/silte/detrito*
		Fluxo úmido de argila sensitiva*
		Corrida de detritos*
		Corrida de lodos*
		Inundação de detritos
		Avalanche de detritos
		Fluxo de terra
		Fluxo de turfa
Deformação de talude	Deformação de talude de montanha	Deformação de talude de solo
	Deformação de talude de rocha	Rastejo de solo
		Solifluxão

*Movimentos que usualmente atingem velocidades extremamente altas

Fonte: Hungr *et al.* (2014)

2.1.2 PARTES DE UM DESLIZAMENTO

Além da classificação dos tipos de movimento de massa, Varnes (1978) descreve os elementos característicos deste fenômeno (Figura 17).

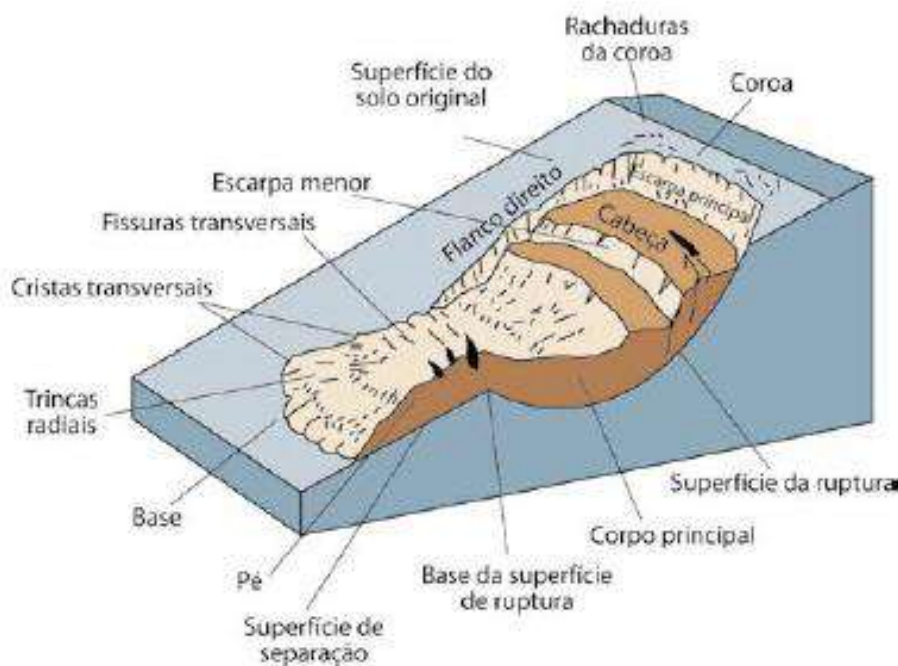


Figura 17 - Partes de um deslizamento de terra (adaptado de Varnes, 1978)

Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

Assim, as partes de um deslizamento, segundo Varnes (1978), são:

- a) Coroa: material deslocado adjacente à região mais elevada da escarpa principal;
- b) Flanco: material deslocado adjacente à lateral da superfície de ruptura;
- c) Pé / Base: parte do deslizamento que tenha se movimentado além da base da superfície de ruptura e que recobre a superfície do terreno original;
- d) Topo / cabeça: parte superior do deslizamento ao longo do contato entre o material deslocado e a escarpa principal;
- e) Corpo principal: parte do material deslocado pelo deslizamento que recobre a superfície de ruptura entre a escarpa principal e a ponta da superfície de ruptura;

f) Escarpa principal: superfície íngreme do solo estável, na borda superior do deslizamento, causada pelo movimento do material deslocado para longe da área estável. É a parte visível da superfície de ruptura;

g) Escarpa menor: superfície íngreme do material deslocado pelo deslizamento de terra, produzida por movimento diferencial dentro da parte deslocada;

h) Superfície original do terreno: superfície do talude que existia antes da ocorrência do deslizamento.

i) Superfície de separação: parte da superfície do terreno original recoberta pela base do deslizamento.

j) Superfície de ruptura: superfície que forma (ou que formou) o limite inferior do material deslocado, abaixo da superfície do terreno original.

2.1.3 DESASTRES ASSOCIADOS A MOVIMENTOS DE MASSA

Sendo o Brasil um país em desenvolvimento, com elevado crescimento urbano desordenado, com grandes desigualdades sociais e com ocupação de encostas, enquadra-se no perfil de lugares com grande susceptibilidade à ocorrência de desastres, principalmente aos relacionados à ocorrência de movimentos de massa. Boa parte da sua população encontra-se excluída socioeconomicamente e ocupa áreas urbanas sem o planejamento devido, causando grandes intervenções em porções elevadas e declivosas do relevo, colocando-se numa posição de grande vulnerabilidade à ocorrência de desastres.

A ocorrência de desastres consiste na interrupção do funcionamento de uma comunidade/sociedade podendo levar a perdas humanas e materiais (UNISDR, 2009), e se contrapõe a capacidade de cada segmento da sociedade em lidar com os processos de risco, que resultam da combinação de ameaças, vulnerabilidade e da inexistência ou insuficiência das medidas de prevenção para dirimir as consequências negativas do mesmo.

Os desastres podem ocorrer em distintas áreas da superfície terrestre, tanto em espaços rurais quanto em urbanos, em porções ocupadas por classes sociais distintas, com funções/aptidões diferenciadas. Mas, tem sido nas áreas urbanizadas, principalmente nas grandes cidades dos países mais pobres, que as consequências se tornam mais acentuadas. A deficiência no planejamento urbano, o crescimento desordenado e a exclusão social de parte

da população, acabou por provocar a desigualdade no uso do solo, gerando a ocupação de áreas naturalmente sensíveis como manguezais, margens de rios, encostas, etc., que são mais expostas a ameaças (Boareto, 2008; Mendonça e Silva, 2020). Esta expansão do solo urbano, acompanhada pela concentração da atividade econômica e da população, em encostas de forma não planejada e segura, não apenas aumenta a quantidade de edificações expostas a deslizamentos, mas também a probabilidade de ocorrerem mortes e perdas econômicas e materiais (Yalin e Jianpingy, 2017).

Segundo Lacerda *et al.* (2016), deslizamentos de terra começaram a ser registrados no Brasil no século XX. Existem dados para o município de Santos; sul de Minas Gerais; região metropolitana do Rio de Janeiro e suas serras vizinhas; região da Serra das Araras, Rio de Janeiro; Serra de Caraguatatuba, São Paulo; o município de Tubarão, Santa Catarina, os municípios de Ouro Preto e Monlevade, Minas Gerais, região da Serra dos Órgãos, Rio de Janeiro; o município do Rio de Janeiro e os municípios de Timbe do Sul e Alto Feliz, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O Quadro 5 apresenta os principais desastres associados a movimento de massa na história do Brasil.

Quadro 5 - Principais desastres associados a movimento de massa na história do Brasil

(continua)

Data	Local	Estado	Mecanismos Predominantes	Mortes	Danos Econômicos	Chuva
10/01/1966	Rio de Janeiro (Região Serrana)	RJ	Escorregamento rotacional e translacional; fluxo de detritos	1.000 723	Extremamente diversificado	287 mm (12hs) 487-675 mm (3 dias)
22/01/1967	Serra das Araras	RJ	Escorregamento translacional; fluxo de detritos	1.700 1.200	Estrada; >100 casas planta hidrolétrica	218-375 mm (1 dia)
20/02/1967	Rio de Janeiro	RJ	Escorregamento rotacional e translacional; fluxo de detritos	200	2 prédio residenciais	137-198 mm (1 dia) 348-401mm (3 dias)
18/03/1967	Caraguatatuba	SP	Escorregamento translacional; fluxo de detritos	120	400 casas; estradas	420 mm (1 dia) 586 mm (2 dias)
02/12/1981	Petrópolis, Teresópolis e Guapimirim	RJ	Escorregamento translacional	41	casas; estação de gás; estrada	288 mm (1 dia)

Quadro 5 - Principais desastres associados a movimento de massa na história do Brasil
(conclusão)

Data	Local	Estado	Mecanismos Predominantes	Mortes	Danos Econômicos	Chuva
27/02/1985	Angra dos Reis	RJ	Escorregamento translacional	0	220m de estrada; rota de fuga e laboratório de uma usina nuclear	129 mm (1 dia)
05/02/1988	Petrópolis	RJ	Escorregamento rotacional e translacional; fluxo de detritos	171 277	5.000 casas	145 mm (1 dia) 414 mm (6 dias)
19/02/1988	Rio de Janeiro	RJ	Escorregamento rotacional e translacional; fluxo de detritos	307	US\$ 935 milhões	177 mm (1 dia) 272 mm (2 dias) 367 mm (3 dias)
06/02/1994	Cubatão	SP	Escorregamento translacional; fluxo de detritos	0	Refinaria (US\$ 44 milhões)	60 mm (1 hr) 250 mm (1 dia)
23/12/1995	Timbé do Sul	SC	Escorregamento translacional; fluxo de detritos	29	20 casas; propriedades rurais	500 mm (1 dia)
13/02/1996	Rio de Janeiro	RJ	Escorregamento rotacional e translacional; fluxo de detritos	1	Centenas de casas destruídas	380 mm (1 dia)
08/02/2002	Angra dos Reis	RJ	Escorregamento rotacional e translacional; fluxo de detritos	35	100 casas destruídas	323 mm (1 dia)
01/11/2008	Vale do Itajaí	SC	Escorregamento translacional; fluxo de detritos	135	Centenas de casas destruídas; duto de gás	104 mm (1 dia) 225 mm (2 dias)
31/12/2009	Angra dos Reis	RJ	Escorregamento translacional	53	Centenas de casas destruídas	170 mm (1 dia) 245 mm (2 dias) 415 mm (3 dias)
05/04/2010	Rio de Janeiro e Niterói	RJ	Escorregamento rotacional e translacional	222	Centenas de casas destruídas	425 mm (2 dias)
11/01/2011	Região Serrana	RJ	Escorregamento translacional; fluxo de detritos	900	Extremamente diversificado (US\$ 2.35 bilhões)	228 mm (1 dia) 300 mm (2 dias)

Fonte: Lacerda *et al.* (2016)

2.2 SISTEMAS DUTOVIÁRIOS

2.2.1 CONCEITOS GERAIS E CARACTERÍSTICAS

Segundo Maltez (2013), duto é a designação genérica de uma instalação constituída por tubos ligados entre si com o objetivo de transportar ou transferir fluidos entre as fronteiras de unidades operacionais geograficamente distintas, e, assim, permitir que grandes quantidades de produtos sejam deslocadas de maneira segura. Os dutos podem ser classificados como submarinos ou terrestres, estes sendo os que operam em terra, enterrados, aparentes ou aéreos.

Serão tratados nesse trabalho apenas dutos considerados terrestres, já que são os mais utilizados e são os que estão mais sujeitos aos desastres associados a movimento de massa. Tratando-se de dutos terrestres, pode-se considerar, de acordo com Maltez (2013), como faixa de dutos ou ainda faixa de servidão, a área sinalizada, com largura de 20 metros, que acompanha na superfície o percurso destes dutos. Esta faixa delimitada tem o objetivo de proteger o traçado do duto, identificar os locais de instalação dos equipamentos e sinalizar os locais onde não se pode fazer escavações, construções, ocupações, queimadas e obras em geral.

Maltez (2013) observa ainda que as faixas de dutos estão localizadas predominantemente em áreas rurais, onde se encontram relevos acidentados, alternando entre regiões de planície e montanha, dando uma singularidade ao perfil das faixas de dutos. Esta singularidade promove um maior risco associado aos movimentos de massa para estas instalações.

A Figura 18 apresenta o exemplo de uma faixa de duto.



Figura 18 - Faixa do duto enterrado OSPLAN em Guararema, SP

Fonte: Maltez (2013)

Em relação à escolha do traçado ou diretriz do duto, Oliveira (2005) menciona que esta etapa deve ser acompanhada de estudos prévios em que levantamentos geomorfológicos e climáticos são elaborados. Com respeito aos aspectos geotécnicos, há uma preocupação com os critérios de estabilização do reaterro das valas, drenagem superficial e revegetação.

A Norma da Petrobras N-2624 (Petrobras, 2014) trata das condições exigíveis para determinação do traçado dos dutos. Apresenta algumas condições para definição do traçado como minimizar a movimentação de terra na fase de construção, obter o menor caminhamento possível, reduzir interferências, evitar locais susceptíveis a mecanismos de falhas geotécnicas, dentre outras. Um programa de mapeamento geológico-geotécnico também é realizado nesta etapa, no qual são interpretadas fotos aéreas e identificadas as ocorrências de rocha em superfície, áreas erodidas, áreas sujeitas a alagamento, áreas de tálus e colúvios e cicatrizes de movimentos de massa em geral.

Para a construção e montagem dos dutos a Norma Petrobras N-464 (Petrobras, 2016) estabelece as etapas para esta fase do projeto, sendo estas:

- locação e marcação da faixa de domínio;
- abertura da pista;
- abertura e preparação da vala;
- transporte, distribuição e manuseio de dutos e outros materiais;
- curvamento dos tubos;
- soldagem dos tubos;
- abaixamento dos tubos;
- cobertura da vala;
- recuperação da pista;
- sinalização; e
- limpeza, calibração e teste hidrostático.

Para cada uma das etapas, a norma apresenta recomendações e cuidados especiais a serem seguidos durante a implantação dos dutos.

2.2.2 O TRANSPORTE DUTOVIÁRIO NO BRASIL

Com a evolução do processo de descentralização do setor petrolífero advindo com a queda no monopólio do petróleo no Brasil, a Petrobras teve necessidade de realizar várias adequações, entre elas a transformação de seus sistemas de transporte de hidrocarbonetos e derivados em uma empresa, voltada para a logística do negócio neste novo cenário. Nascia assim a Petrobras Transporte SA, Transpetro SA.

A Transpetro SA passou especificamente a gerenciar dutos e terminais que faziam parte do antigo sistema de transporte da Petrobras, além de iniciar a comercialização do transporte de produtos de outras empresas petrolíferas, através de regulamentação específica.

A Figura 19 apresenta um mapa com a localização dos dutos operados pela Transpetro, que opera e mantém uma malha de mais de 14.000 quilômetros de dutos no Brasil.



Figura 19 - Dutos e Terminais no Brasil

Fonte: Transpetro (2024)

Além da Transpetro outro importante *player* no transporte de gás no Brasil é a empresa Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A. (TBG), cuja participação da Petrobras é de cerca de 51%. A TBG é responsável pela operação e manutenção do gasoduto Bolívia-Brasil, maior gasoduto da América Latina com cerca de 3.150 quilômetros, sendo 2.593 quilômetros em solo brasileiro.

A Figura 20 apresenta o traçado do gasoduto Bolívia-Brasil.



Figura 20 - Traçado do Gasoduto Bolívia-Brasil

Fonte: TBG (2005)

Como pode ser observado nas Figuras 19 e 20, grande parte da malha dutoviária brasileira se encontra na região sul e sudeste, tendo suas faixas sido construídas em muitas áreas sobre a Serra do Mar e Serra Geral. As Figuras 21 e 22 indicam, respectivamente a localização da Serra do Mar e da Serra Geral.



Figura 21 - Localização da Serra do Mar
Fonte: Adaptado de BRASIL (2011)

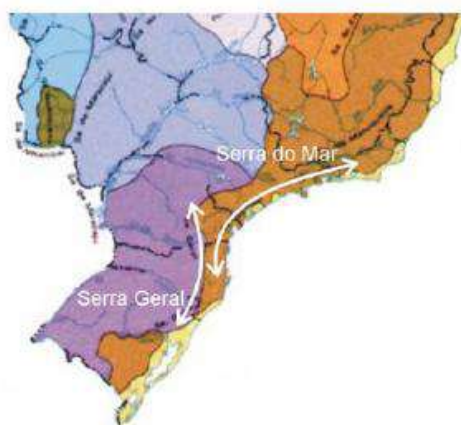


Figura 22 - Localização da Serra Geral
Fonte: Adaptado de BRASIL (2011)

Segundo Santos (2004), a Serra do Mar possui características peculiares quanto à sua morfologia e geologia, que, em conjunto com as condições climáticas (pluviometria) muito contribui para as ocorrências de instabilidades e situações de risco. As movimentações de massas (rastejos, escorregamentos translacionais e rotacionais, desprendimentos de blocos de rocha e corridas de detritos) devem-se à combinação de fatores ligados ao relevo (declividade), a pluviosidade e aos diversos materiais e características envolvidas.

Também foi observado por Lacerda (1997) que a Serra do Mar pertence ao Complexo Cristalino Brasileiro, possuindo 1500 quilômetros de extensão e sendo palco de vários acidentes geotécnicos como deslizamentos em áreas ocupadas.

Já a Serra Geral, conforme Coutinho (1991) observa, é constituída de rochas vulcânicas efusivas da bacia do Paraná, sequências básicas e ácidas, representada por basaltos

e rioclitos e com ocorrências de lentes de arenitos interderrames. Essa borda é representada por terminais escarpados e profundamente dissecados por erosão fluvial, com vertentes íngremes sujeitas a escorregamentos translacionais e corridas de lama.

Alguns autores relatam a ocorrência de movimentos de massa em faixas de dutos no Brasil, os quais causaram acidentes provocando a ruptura destes dutos.

Almeida *et al.* (2003) reportam o acompanhamento de um duto instalado em uma massa de talus-colúvio em Coroa Grande, Rio de Janeiro, em região da Serra do Mar. Neste local, o oleoduto encontrava-se inserido numa massa que apresentou deslocamento da ordem de quatro metros em vinte anos. Em função dos movimentos lentos da massa, o duto sofreu deslocamentos consideráveis, colocando a estrutura em situação de risco.

Soares e Musman (2001) apresentam uma ruptura de um oleoduto implantado na Serra do Mar na região de Paranaguá, Paraná. O duto foi submetido a tensões elevadas de tração, proporcionadas pelo efeito da movimentação de um corpo de colúvio-talus, no qual o duto havia sido implantado.

2.2.3 MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE TALUDES E O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO EM FAIXAS DE DUTOS

Monitoramento de taludes é a prática de observação contínua e sistemática da estabilidade de encostas e taludes, visando identificar sinais de instabilidade e prevenir acidentes como deslizamentos, rolamentos de blocos e erosões. Através de diversos métodos e instrumentos, como inclinômetros, piezômetros e extensômetros, é possível medir e analisar movimentos do solo, variações de umidade, pressões e outros parâmetros geotécnicos relevantes. Essa atividade é fundamental em áreas de risco geológico, como encostas urbanas, rodovias, mineradoras e obras civis em geral.

Augusto Filho e Virgili (1998) apresentam os principais tipos de instrumentos utilizados no monitoramento de taludes. Estes tipos de instrumentos estão relacionados no Quadro 6.

Quadro 6 - Principais tipos de instrumentos utilizados em monitoramento de taludes

Instrumentos	Parâmetros
Marcos superficiais	Deslocamentos e recalques
Prismas óticos	
Extensômetros (haste e fio)	
Fissurômetros	
Medidores de recalque	
Indicadores de movimentações em profundidade	
Inclinômetros	
Células de carga em tirantes (ancorados)	Cargas
Piezômetros (tipo Casagrande, de máxima, hidráulicos e elétricos)	Pressões neutras
Tensiômetros (pressões negativas, de sucção)	Pressões totais
Medidores de vazão (hidrômetros, vertedouros, recipientes)	Vazões d'água

Fonte: Augusto Filho e Virgili (1998)

Especificamente para monitoramento de dutos, Michaelsen (2011) cita extensômetros soldados na parede do duto para medida de deformações diretamente na superfície deste e um sistema mais complexo, capaz de coletar, de forma contínua, os dados obtidos através de instrumentação geotécnica e transmiti-los diretamente para centrais de monitoramento, juntamente com dados meteorológicos provenientes de pluviômetros, barômetros e termômetros. Este sistema permite acessar as leituras em tempo real, arquivar dados e emitir alertas caso necessário.

Amaral *et al.* (2004) observa ainda que em monitoramento de gasodutos e oleodutos são instalados equipamentos que permitem analisar algumas variáveis relevantes como:

- a) Equipamentos de medição de fatores climáticos como temperatura, pressão e índice pluviométricos;
- b) Piezômetros e inclinômetros verticais para acompanhamento do movimento do terreno;
- c) Instrumentação na parede do duto para avaliação das tensões.

Da mesma forma que em outras obras lineares, o sensoriamento remoto em faixas de dutos oferece uma solução eficiente para monitorar taludes de forma contínua e sistemática. Sua capacidade de coletar dados sem contato e em grandes áreas, surge como uma ferramenta poderosa para detecção precoce de instabilidades, erosões e outras alterações no terreno.

Através de imagens de satélite, é possível obter informações detalhadas sobre o terreno, permitindo a identificação de áreas de risco, o acompanhamento da evolução de processos erosivos e a avaliação da eficácia de medidas de controle. Trabalhos vem sendo publicados para demonstrar a utilidade deste tipo de monitoramento.

Marques *et al.* (2013) desenvolveram um procedimento metodológico para monitoramento de faixa de dutos utilizando imagens de alta resolução espacial para detecção de mudanças e na classificação do uso e cobertura da terra com o objetivo de identificar elementos que possam representar riscos para os dutos.

Neste trabalho foi estudado o traçado da faixa de duto Rio de Janeiro-Belo Horizonte, delimitando-se um setor com extensão de 30,7 km e 400 m de largura, compreendendo uma área de 11,89 km².

Ao final conclui-se que o resultado atingiu valores de acertos próximos ao limite de aplicação da técnica, para dados multitemporais com grande complexidade e diversidade de ocupação do espaço.

Inspeções *in line* são executadas no interior dos dutos por meio de equipamentos denominados de PIG's, que são utilizados para diversas finalidades, como limpeza, verificação de anomalias geométricas e redução de espessura na parede dos dutos. Oliveira (2005) apresenta as características do equipamento "GEOPIG" que tem a aplicação direta no monitoramento geotécnico de faixas de dutos através da verificação de deslocamentos da tubulação. Cita ainda que estes deslocamentos podem ser identificados e monitorados com acurácia e eficiência pois o equipamento possui um sistema de navegação inercial, calibradores mecânicos, odômetros e sensores de temperatura e pressão e vindo sendo usados há mais de 14 anos. A ferramenta possui pontos fortes como a exclusão da subjetividade comparado com os processos tradicionais de monitoramento de faixas e a possibilidade de inspeção de toda a extensão do duto. Como pontos fracos cita seu elevado custo e a impossibilidade de se detectar eventos instantâneos como corridas de lama e escorregamentos rápidos em solo residual (Oliveira, 2005).

Além disso, vários estudos têm sido realizados para investigar a eficácia da Interferometria Diferencial SAR (DInSAR) para detectar movimentos de terra. O DInSAR tem sido usado com sucesso para monitorar subsidência e elevação da superfície terrestre com aplicações específicas, como deslizamentos e outros deslocamentos de solo.

Rott e Nagler (2006) citam alguns exemplos da utilização de imagens de satélite para mapear características geomorfológicas e topográficas relevantes para o inventário de deslizamentos e avaliação de risco. Em seu trabalho, Rott e Nagler (2006) apresentam métodos e aplicações do InSAR para detectar e mapear o movimento de deslizamentos de terra por meio de pares interferométricos, usando dados SAR transmitidos por satélite cobrindo várias seções dos Alpes Austríacos e Suíços. Neste trabalho são relatadas as possibilidades e as restrições do InSAR para monitorar o movimento de deslizamentos de terra.

Oliveira (2005) apresenta alguns bons exemplos da aplicação da técnica DInSAR, dentre eles descreve um monitoramento realizado pela Companhia de Gás do Sul da Califórnia em área com ocorrências frequentes de rupturas de dutos em função de subsidências do terreno combinadas com deslocamentos horizontais causadas pela retirada de petróleo do subsolo. A utilização da técnica DInSAR permitiu o monitoramento contínuo de uma área de 50 km por 50 km com erro da ordem de poucos milímetros, resultado que foi validado com a correlação dos dados obtidos com a técnica DInSAR com os dados obtidos por leitura de marcos superficiais com o uso de GPS. Oliveira (2005) cita ainda um caso de monitoramento de um duto pela Trans Alaskan com boas correlações entre as medidas obtidas pela técnica DInSAR e o monitoramento realizado com GPS.

Um último exemplo a ser citado foi um projeto piloto realizado pela Transpetro para monitoramento da faixa do Oleoduto Rio-Baía da Ilha Grande (ORBIG). Este projeto utilizou imagens RADARSAT-1 para aplicação da técnica de interferometria para monitoramento de deslocamentos de terreno na faixa de dutos (Figura 23). Com o objetivo de minimizar os efeitos da variação temporal da umidade do solo e de efeitos provindos da vegetação, que podem interferir, na acurácia das medições, cones refletores (Figura 24) foram instalados na superfície do terreno de modo a aumentar a intensidade da energia refletida para o radar, criando pontos de referência fixos na imagem SAR e garantindo um sinal estável e bem definido.

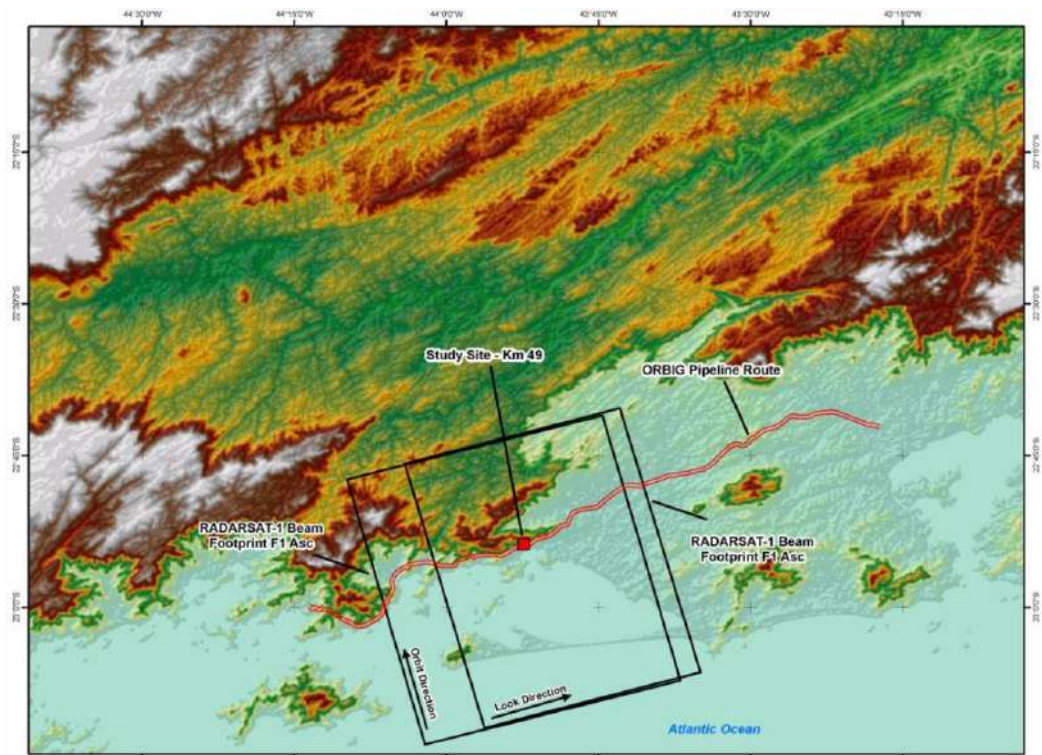


Figura 23 - Faixa de imageamento para análise DInSAR na faixa do ORBIG

Fonte: Transpetro (2007)



Figura 24 - Instalação de cones refletivos

Fonte: Transpetro (2007)

A técnica *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) foi utilizada para medição dos deslocamentos. Inicialmente foi determinada a densidade de espalhadores persistentes (PS) nos arredores da faixa de dutos (Figura 25). Estes dados foram então usados para avaliar o grau em que a técnica PSI poderia ser empregada para detectar e medir os movimentos da superfície com precisão.

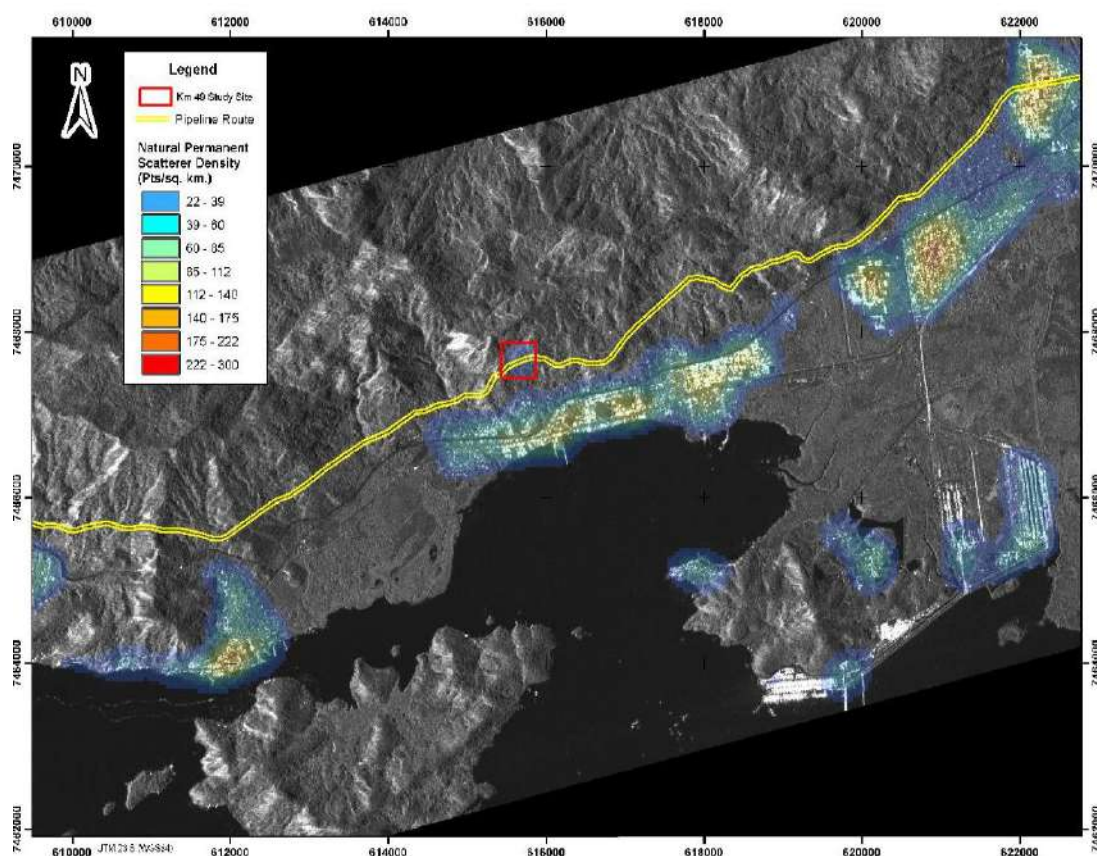


Figura 25 - Densidade de espalhadores persistentes (PS) nas proximidades da área de interesse

Fonte: Transpetro (2007)

A figura 26 apresenta os resultados dos deslocamentos na direção da linha de visada para alguns PS selecionados.

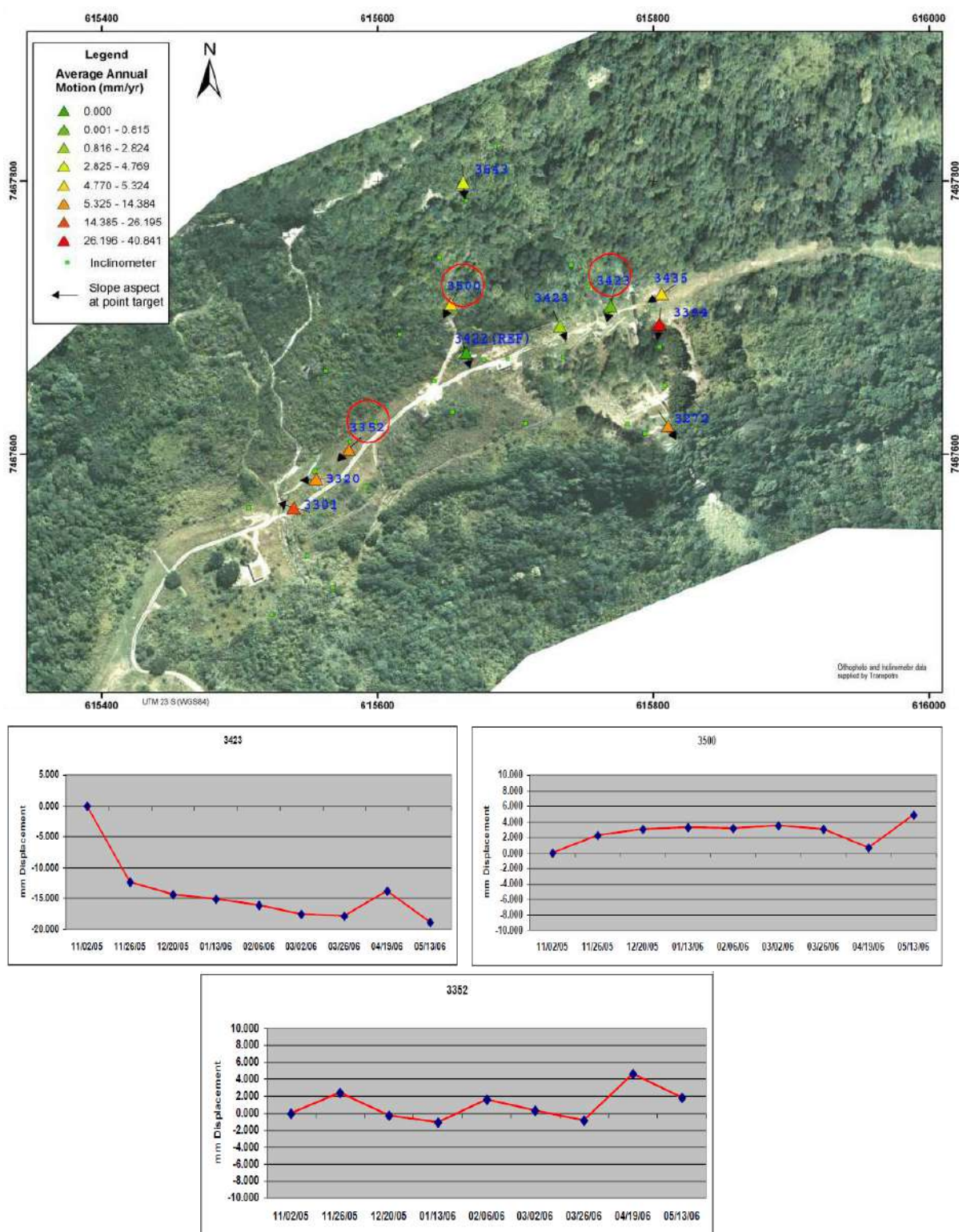


Figura 26 - Resultados dos deslocamentos na direção da linha de visada para estudo feito na faixa do ORBIG

Fonte: Transpetro (2007)

2.3 VISÃO GERAL DO SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR

Sensoriamento remoto por radar é uma técnica de observação da superfície terrestre que utiliza ondas de rádio para adquirir imagens e informações. O radar de abertura sintética (SAR) é o sistema mais comum, oferecendo alta resolução espacial e capacidade de gerar produtos interferométricos (InSAR) para análise de deformações e elevações.

2.3.1 SISTEMA SAR

O radar de abertura sintética, do inglês *Synthetic Aperture Radar* (SAR), é composto por um sensor ativo que é capaz de gerar sua própria energia eletromagnética na faixa das micro-ondas e, de acordo com Trevett (1986), consegue realizar medições da superfície terrestre em condições adversas do clima e até mesmo em regiões cobertas de nuvens.

Sendo assim, SAR é um sistema de imageamento ativo e coerente, que envia a intervalos regulares pulsos de micro-ondas, e registra a parcela da intensidade da radiação retroespalhada pela superfície.

O funcionamento mais elementar de um sistema radar consiste na detecção e medida da distância entre o sensor e o alvo, a partir da determinação do tempo de atraso do sinal emitido. Segundo Hartwig (2014), um sistema de imageamento com radar opera na frequência das micro-ondas, entre 0,30 a 30 GHz e em função da frequência da banda utilizada podem-se obter diferentes respostas dos alvos, sendo, a rigor, quanto maior a frequência, menor a profundidade de penetração da radiação no solo.

Uma onda de radar (Figura 27) é uma onda eletromagnética caracterizada por: frequência, amplitude e fase. A amplitude está associada a quantidade de energia transmitida e é a medida da altura da onda para um valor positivo e um valor negativo. A partir de um valor inicial, a onda cresce e atinge a amplitude máxima, decresce, se anula, atinge sua amplitude negativa mínima e volta a crescer até se anular novamente. Essa sequência compõe um ciclo. A frequência é o número de ciclos por segundo e uma medida de energia.

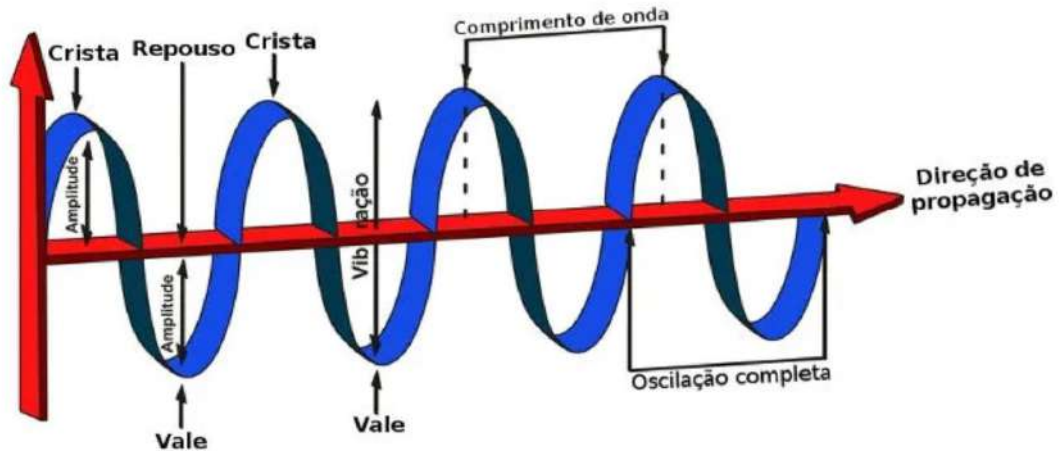


Figura 27 - Elementos de ondas

Fonte: Brasil Escola (2024)

A fase é uma medida da posição de um ponto específico na onda em seu ciclo de oscilação, em relação a um ponto de referência no tempo ou no espaço. Ela é expressa em graus ou radianos e seus valores podem variar no intervalo de 0 a 2π (0 a 360°). Duas ondas estão em diferença de fase quando num instante de tempo qualquer tomado como referência, os valores angulares das duas são diferentes (Figura 28).

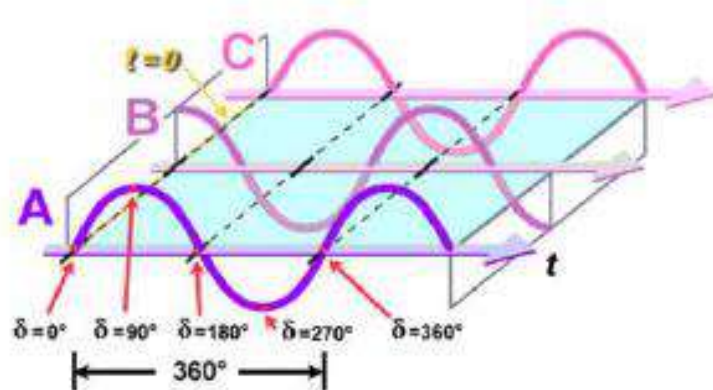


Figura 28 - Representação esquemática da fase em ondas senoidais num intervalo de tempo

$t=0$

As ondas A e B estão 90° fora de fase enquanto A e C estão em fase.

Fonte: Gaboardi (2002)

Um outro ponto a ser observado é a capacidade de penetração do sinal em alvos de interesse. O tamanho e a densidade dos elementos vegetais têm relação direta no tipo de interação com as micro-ondas incidentes. Pequenos comprimentos de onda, como o das bandas X e C, por exemplo, trazem informações sobre as camadas superficiais do dossel vegetal, através do retroespalhamento produzido nas folhas e pequenos galhos. Já comprimentos de onda maiores, como os da banda L e P, têm uma penetração maior no dossel vegetal e o retroespalhamento é causado pelos galhos e tronco (Dobson, 2000). Dependendo do tipo do dossel, as bandas L e P podem trazer até informações do solo sob a floresta.

A Figura 29 ilustra todo o espectro eletromagnético.

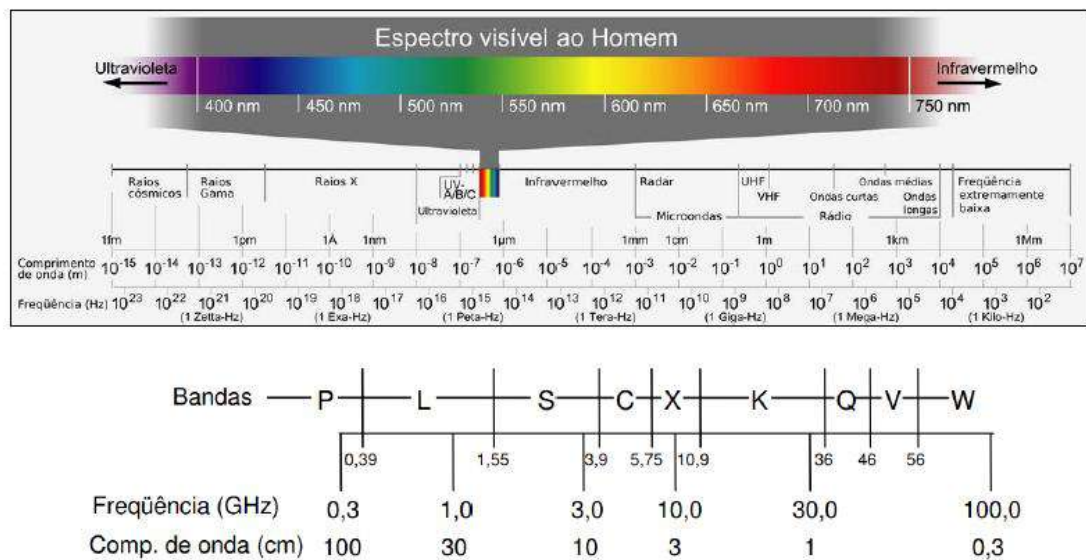


Figura 29 - Comprimento e frequência de ondas no espectro eletromagnético

Fonte: Adaptado de Novo (1995)

Além dos comprimentos de ondas, os sensores dos radares possuem características próprias a respeito à orientação do campo elétrico da onda eletromagnética transmitida ou recebida pelo radar. Esta orientação pode ser linear (horizontal ou vertical), circular (direita ou esquerda) ou elíptica, dependendo da configuração da antena e do tipo de sinal utilizado. Uma antena de radar pode ser construída para transmitir e receber ondas em orientações específicas, sendo indicada como HH (transmitida e recebida horizontalmente), VV (transmitida e recebida verticalmente), HV (transmitida horizontalmente e recebida verticalmente) ou VH (transmitida verticalmente e recebida horizontalmente). Esta característica, chamada de polarização, permite a obtenção de informações variadas sobre a superfície, por exemplo,

dimensões de derramamento de óleo no oceano, vigilância e segurança marítima, mapeamento de deformações urbana, impacto relacionados a enchentes e terremotos, entre outros.

A figura 30 apresenta alguns dos tipos de polarização relacionados acima.

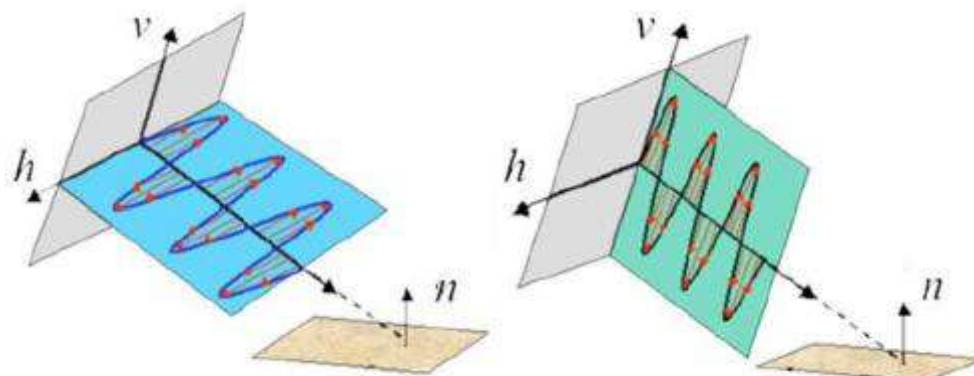


Figura 30 - Representação das polarizações horizontal e vertical

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Em uma imagem SAR, o brilho (ou intensidade) de cada pixel é proporcional à potência do sinal de retorno recebido pela antena, que varia em função da interação entre os parâmetros do sistema, dos alvos e do sinal de retorno.

Hartwig (2014) observa que a capacidade de um sensor em discriminar objetos no terreno é denominada resolução espacial, e representa uma medida da qualidade das imagens de radar. A resolução espacial depende de dois fatores principais: a resolução no alcance (distância) e a resolução na direção angular ou na direção do voo (azimutal).

Radares de abertura real (RAR) possuem baixa resolução espacial principalmente devido às limitações impostas pelo tamanho físico da antena e pela física da propagação de ondas eletromagnéticas.

Hartwig (2014) apresenta ainda um exemplo da baixa resolução de sistemas de radares de abertura real, onde um sistema que opera em banda L (frequência de 1 GHz), com tamanho de antena igual a 3m, a uma distância de 2 km da superfície teria uma resolução espacial igual a 20 m, mas no caso deste mesmo sistema estar posicionado em uma plataforma orbital a 1.000 km de altitude, a resolução espacial não seria inferior a 10 km.

Segundo Mura *et al.* (2021), essas limitações fazem com que a dimensão das antenas devesse ter centenas de metros para obter uma grande resolução. Isto seria obviamente impossível tanto para aeronaves quanto para missões espaciais, onde o tamanho e o peso do

satélite devem ser minimizados para evitar aumento exponencial de custos em carga útil, plataforma e lançamento.

Para resolver este problema foi desenvolvido o conceito de abertura sintética (SAR) pelo matemático e engenheiro americano Carl Atwood Wiley, da *Goodyear Aerospace*. Os sistemas de abertura sintética consistem em sintetizar uma antena de tamanho muito maior que seu tamanho físico, por meio do processamento digital dos sinais refletidos pelo alvo enquanto ele é “visto” pela antena (Hartwig, 2014), fazendo uso do movimento relativo da plataforma e do alvo no terreno. A Figura 31 exemplifica a aplicação do princípio do radar de abertura sintética.

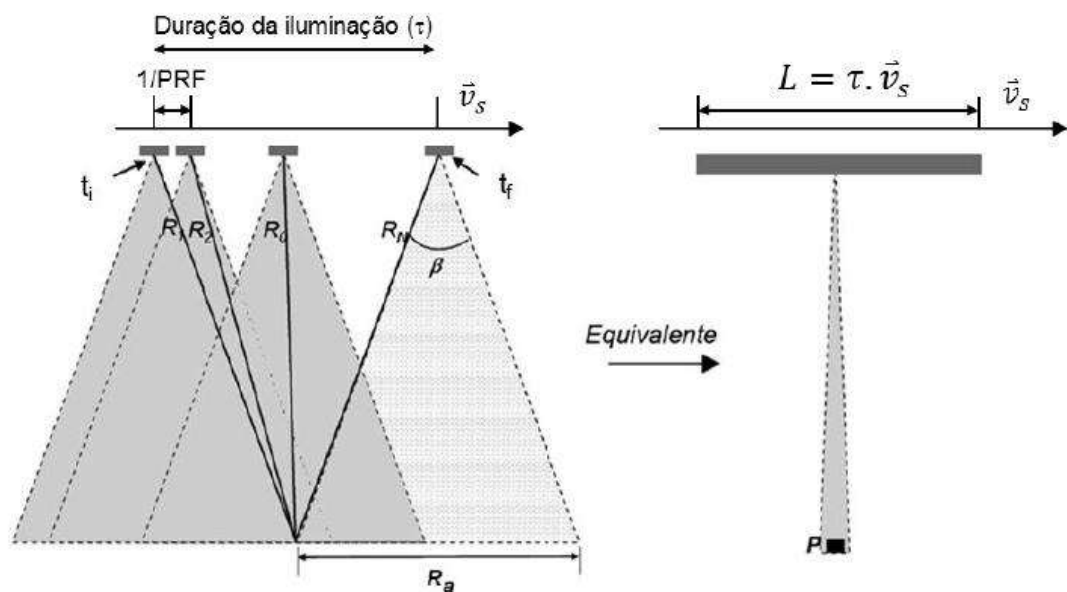


Figura 31 - Princípio do Radar de Abertura Sintética (SAR)

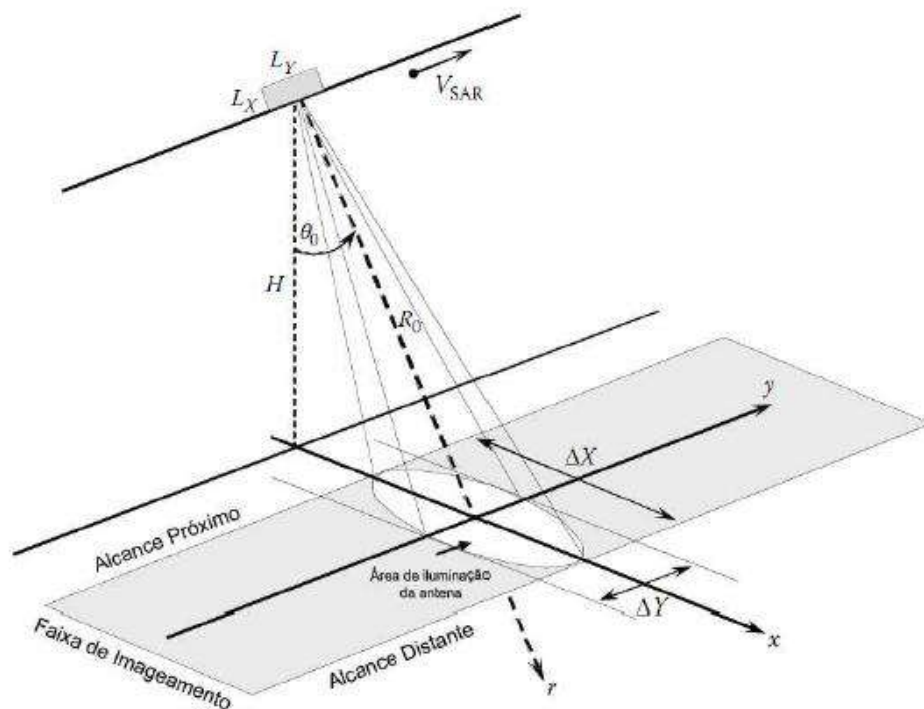
O alvo num ponto P é “visto” pelo sensor em diferentes instantes, o que permite simular uma antena de grande dimensão (L), e assim alcançar resoluções espaciais maiores. B = largura feixe de imageamento.

Fonte: Hartwig (2014)

2.3.2 FORMAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA IMAGEM SAR

Silva (2010) descreve a configuração geométrica de um sistema SAR. Na Figura 32 são apresentados os principais elementos que descrevem esta configuração geométrica considerando o sistema SAR operando em uma plataforma móvel, sendo esta plataforma uma aeronave, satélite ou ônibus espacial (*Shuttle*).

Considerando que a plataforma se situa a uma altura H da superfície terrestre e se move com uma velocidade V_{SAR} . A antena que compõe o sistema SAR é posicionada perpendicularmente a direção do voo. A direção do voo é referida como “azimute” (eixo Y) e a direção ortogonal a ela (eixo x), a qual aponta a antena é denominada de direção em alcance ou radial (*range*). O feixe de iluminação da antena é direcionado à superfície da Terra. A direção do feixe incidente forma com a normal à superfície, o ângulo de incidência θ_0 , medido no alvo. O eixo radial ou linha de visada do radar é denominado de “*slant-range*” (r), enquanto que a área coberta pelo feixe da antena na superfície do terreno é referida como “área de iluminação da antena” (*antenna footprint*). A região da superfície terrestre escaneada pelo sensor quando este se movimenta é definida como faixa de imageamento (*swath*) do radar.



(a)

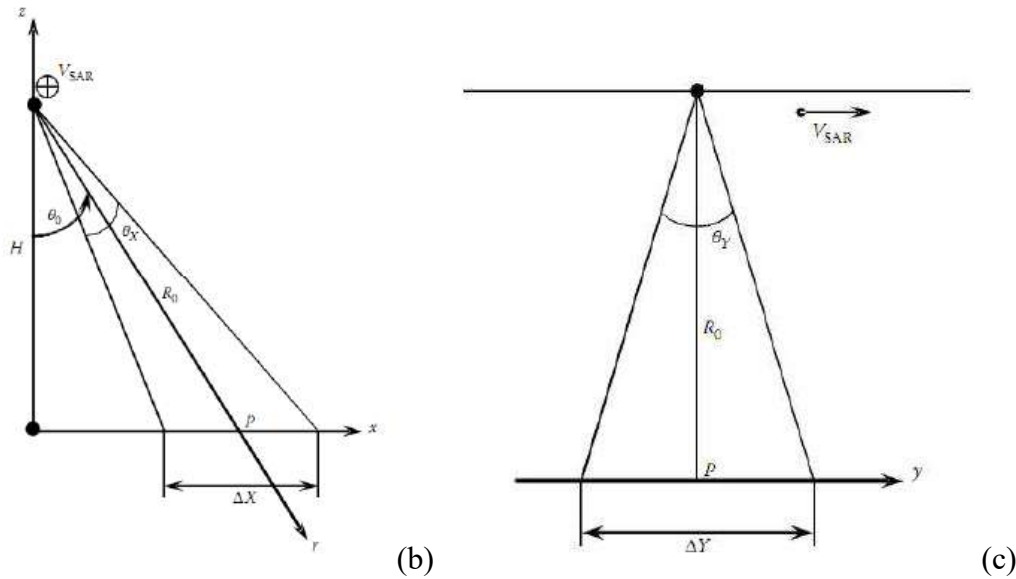


Figura 32 - (a) Visão em perspectiva da geometria de imageamento do radar imageador, (b) visão lateral, (c) visão frontal. Os parâmetros Δx e Δy referem-se a variações na direção radial projetada e azimutal, respectivamente

Fonte: Adaptada de Lee e Pottier (2009)

Há três diferentes modos de aquisição de imagens SAR, a partir do controle do padrão de radiação da antena, a saber: *spotlight*, *stripmap* e *scanSAR* (Erickson, 2005; Moreira *et al.* 2013). No modo *spotlight*, a antena é dirigida para iluminar uma área particular durante todo o tempo de imageamento, permitindo obter maiores detalhes de áreas específicas. No modo *stripmap*, a antena é apontada em um ângulo fixo durante a coleta de dados ao longo da linha de voo, o que resulta em uma faixa de imageamento paralela ao deslocamento da plataforma. O modo *stripmap* permite cobrir áreas no terreno maiores quando comparadas ao modo *spotlight*, porém com menor nível de detalhe, sendo um dos modos mais usados nos satélites atuais. No modo *scanSAR*, o ângulo de elevação da antena é variado o que corresponderia a múltiplas faixas de imageamento (*swath*), que, quando integradas, possibilitam cobrir imensas áreas no terreno, porém com nível de detalhamento bem inferior ao dos modos anteriores.

A Figura 33 apresenta os modos de imageamento SAR.

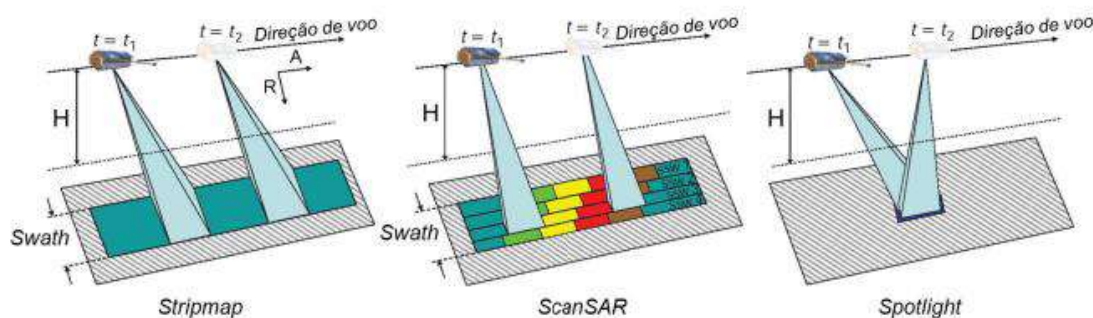


Figura 33 - Modos de Imageamento SAR

H - altura vertical da plataforma, A – direção em azimute e R – direção em alcance

Fonte: Moreira *et al.* (2013)

Os sistemas SAR orbitais podem operar em órbitas ascendente e/ou descendente. Na primeira, o satélite se desloca de sul para norte, com visada para leste, ao passo que, na segunda, o satélite se desloca de norte para sul, com visada para oeste, ou seja, iluminam a mesma área, sob diferentes geometrias de observação (Figura 34). Isso pode ser interessante, por exemplo, em estudos geológicos, quando se deseja realçar estruturas de diferentes orientações. Além disso, o sensor não ilumina a superfície terrestre a partir do nadir como nos sensores ópticos, mas ao longo da linha de visada do sensor (LoS - *line-of-sight*), que pode variar bastante em relação a vertical.

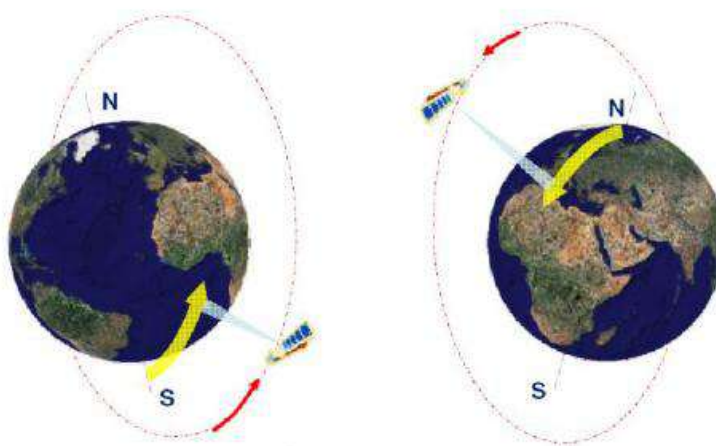


Figura 34 - Geometria de imageamento orbital ascendente (à esquerda) e descendente (à direita)

Fonte: Hartwig (2014)

2.3.3 INTERFEROMETRIA SAR (InSAR)

Segundo Mura et al (2021), o termo interferometria é derivado da palavra interferência, que expressa um fenômeno resultante da interação entre ondas de qualquer tipo.

Hartwig (2014) relata o experimento realizado por Thomas Young em 1803 conhecido como dupla fenda. Neste experimento, Thomas Young fez passar um feixe de luz monocromática (único comprimento de onda) coerente atravessar duas pequenas aberturas e observou que ao se combinarem, os feixes produziram um padrão de faixas claras e escuras justapostas, denominadas como franjas interferométricas. As faixas claras eram produzidas pela combinação construtiva das ondas, enquanto as faixas escuras pela combinação destrutiva. Young demonstrou que o padrão de franjas dependia da diferença de fase ($\Delta\Phi$), sendo proporcional à diferença de percurso dos feixes de luz (ΔR), conforme a relação (Tipler e Mosca, 2009):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1)$$

onde λ é o comprimento de onda e a fase é uma medida angular, que varia, conforme citado anteriormente, de 0 a 360° (ou 0 a 2π) e indica em qual estágio do ciclo a onda se encontra num determinado instante.

Estes princípios foram aplicados à interferometria de radar de abertura sintética (InSAR), que consiste na determinação da diferença de fase ($\Delta\Phi$) de pixels homólogos entre duas imagens complexas de uma mesma área, sob condições de geometria de iluminação similares, cujo resultado é um interferograma. Um interferograma é um mapa bidimensional que retrata a variação de fase relativa, sendo representada por franjas de igual valor (Figura 35) (Gens e Van Genderen, 1996; Massonnet e Feigl, 1998).



Figura 35 - Exemplo de interferograma do Monte Etna, sul da Itália

Codificado no espaço de cores IHS: H - matiz (diferença de fase), S – saturação (coerência interferométrica) e I - intensidade. Cada franja representa 250m de elevação ($\Delta\Phi = 2\pi$). Nas regiões onde o terreno é mais plano (extremidades da imagem), o espaçamento das franjas é maior. A área da imagem é de aproximadamente 40 x 40 km. O sombreamento representa o relevo (MDE), com iluminação vinda da esquerda. Notar a similaridade das franjas com a topografia

Fonte: Massonnet e Feigl (1998)

Curlander e McDonough (1991) definem a interferometria por Radar de Abertura Sintética, também conhecido como InSAR (*Synthetic Aperture Radar*), como uma técnica de imageamento que utiliza um sistema SAR. A técnica InSAR explora a informação de fase contida no sinal radar de pelo menos duas imagens SAR adquiridas sobre a mesma área do terreno, e que uma vez correlacionadas formam um interferograma, definido como uma imagem de diferenças de fase, ou seja, de diferenças de trajeto das ondas emitidas pelo radar entre duas tomadas de imagens da superfície.

A diferença de fase, também chamada de fase interferométrica, é a medida fundamental em InSAR. A fase do sinal que um SAR fornece é igual a duas partes demonstrada na Equação 2 (Zebker, 2000):

$$\Delta\phi = \phi_V + \phi_E \quad (2)$$

Onde, o primeiro termo ΦV representa a propagação da radiação eletromagnética e é proporcional à distância de ida e volta (sensor-alvo-sensor) percorrida pelo sinal e o segundo termo ΦE , representa a dispersão do sinal devido a sua interação com a superfície imageada.

Como o alvo apresenta a mesma dispersão radiométrica, ou seja, o elemento de resolução se comporta da mesma maneira para dois sinais observados S1 e S2, então diferenciando a fase $\Phi 1$ e $\Phi 2$ dos dois, independente do tempo, teremos a diferença expressa pela Equação 3:

$$\Delta\phi = \phi V1 - \phi V2 \quad (3)$$

O cálculo de uma determinada posição do ponto P na superfície do terreno (Figura 36) também considera a diferença da distância entre os sensores S1 e S2 e o ponto P em relação a uma superfície de referência (Goblirsch e Pasquali,1996). Havendo qualquer alteração na superfície do solo, existem, conseqüentemente, variações no comprimento do trajeto das ondas eletromagnéticas emitidas pelo radar, podendo ser mensuráveis por InSAR. A interferometria diferencial baseia-se no cálculo da diferença de fase dessas ondas, calculadas em cada pixel que forma a imagem interferométrica, considerando duas imagens adquiridas em momentos diferentes ou até no mesmo instante.

Mura *et al.* (2021) observam ainda que cada pixel da imagem interferométrica está relacionado com a elevação do terreno, correspondente à célula de resolução no solo, possibilitando com isso a geração de um modelo digital de elevação (MDE).

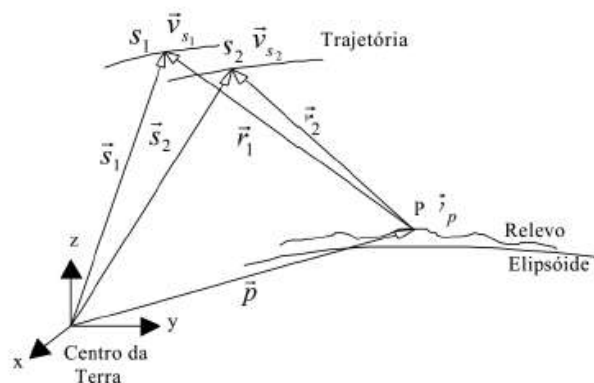


Figura 36 - Representação geométrica do posicionamento de um ponto P na superfície imageada em tempos distintos

Fonte: Nievinski (2004)

A aquisição de um par de imagens para a geração da fase interferométrica pode ser conseguida de dois modos (Mura *et al.*, 2021):

- Utilizando-se duas antenas na mesma plataforma, separadas por uma distância chamada de linha de base (B). Essa maneira é conhecida como interferometria de uma passagem, utilizada em plataformas aerotransportadas.
- Utilizando-se uma antena com duas passagens sobre a mesma área, também conhecida como interferometria de duas passagens. Nesse caso, a linha de base (B) depende da distância entre duas órbitas.

A Figura 37 ilustra os modos de aquisição utilizados na interferometria SAR.

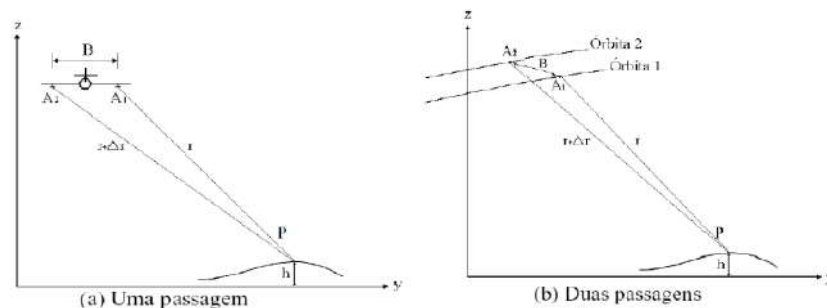


Figura 37 - Modos de aquisição do par interferométrico: (a) uma passagem; (b) duas passagens

Fonte: Mura *et al.* (2021)

Hartwig (2014) destaca a geometria básica de um imageamento InSAR através da figura 38. As antenas S1 e S2 estão separadas espacialmente por uma distância B (linha de base) na direção perpendicular à trajetória das plataformas.

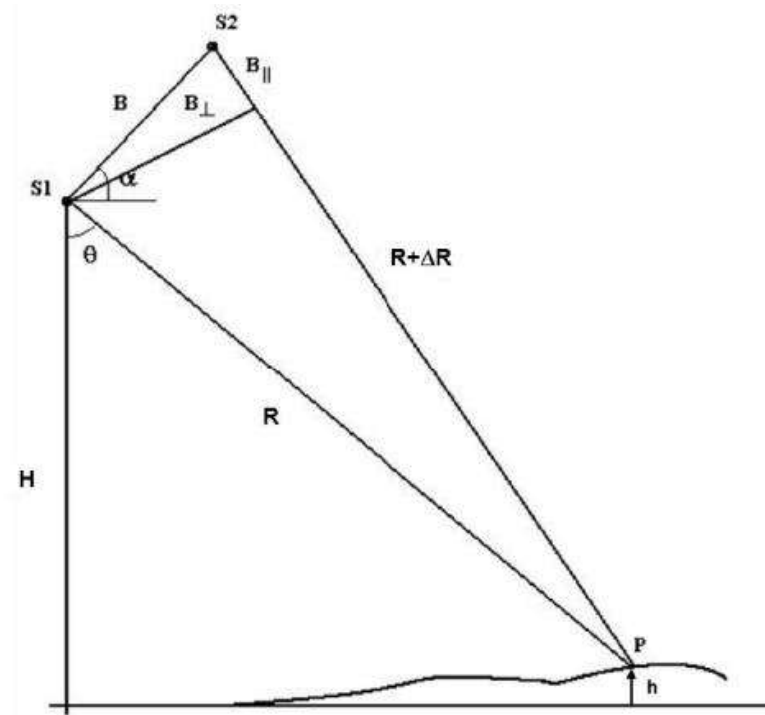


Figura 38 - Geometria do imageamento InSAR

S1 e S2 correspondem às posições das antenas. B é a linha de base, $B_{\perp}$ é a componente perpendicular da linha-base, $B_{\parallel}$ é a componente paralela da linha-base, α é o ângulo de inclinação da linha de base, θ é o ângulo de visada do sensor, H é a altura da plataforma, R corresponde à distância em alcance e h é a altitude do terreno no ponto P com relação a uma superfície de referência (Datum).

Fonte: Hartwig (2014)

Segundo Mura *et al.* (2021), a diferença de fase $\Delta\Phi$ é diretamente proporcional à distância entre os sensores e que $B_{\perp}$ e ΔR é a diferença entre as trajetórias do sinal das antenas S1 e S2, sendo que estas dependem da altura h do ponto P . Com isso é possível calcular a altura h do ponto P a partir da diferença de fase interferométrica $\Delta\Phi$.

2.3.3 INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR (DInSAR)

A técnica de Interferometria Diferencial SAR (DInSAR), ou DInSAR clássica, é uma extensão da interferometria SAR (InSAR), utilizada para medir variações na superfície terrestre na direção de visada do radar, analisando diferenças entre interferogramas obtidos

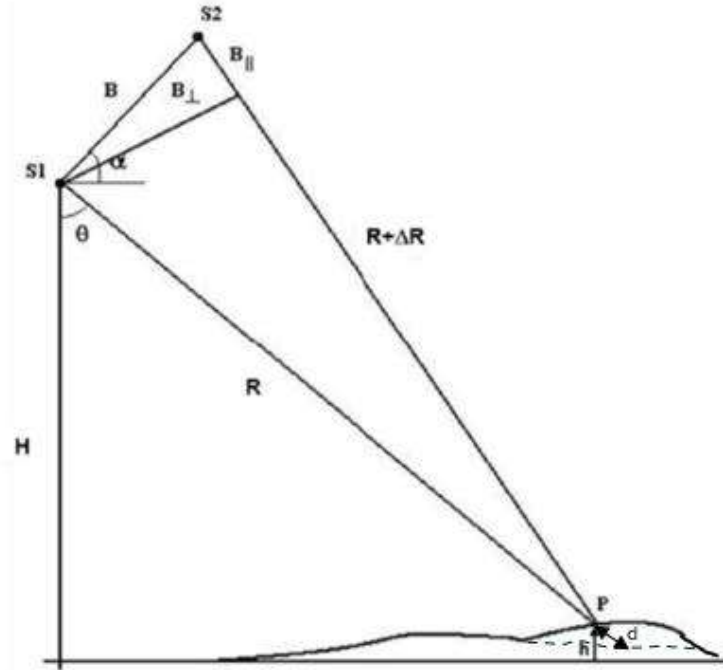


Figura 40 - Interferometria SAR ilustrando uma deformação do terreno (d) ocorrida entre a primeira (S1) e segunda (S2) aquisição de imagens

Fonte: Adaptado de Mura *et al.* (2021) e Hartwig (2014)

A fase interferométrica resultante é constituída pelas componentes de fase relacionadas a altitude do terreno (h), deslocamento provocado por mudanças do terreno (d_{desl}), perturbação atmosférica (Φ_{atm}), erro na estimativa da linha de base (Φ_{β}), e ruídos do sistema (Φ_{η}), podendo ser representada por:

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda R_{\perp} \sin\theta} h + \frac{4\pi}{\lambda} d_{desl} + \Phi_{atm} + \Phi_{\beta} + \Phi_{\eta} \quad (5)$$

A técnica DInSAR clássica utiliza normalmente um MDE (modelo digital de elevação) de boa precisão., que pode ser obtido por interferometria SAR ou outras fontes (par estereoscópico, LiDAR etc), para que seja simulada uma fase correspondente ao MDE na geometria de aquisição do sensor SAR. A fase do MDE pode ser subtraída de $\Delta\Phi$ resultando em uma fase interferométrica diferencial representada por:

$$\Delta\Phi_{di} = \frac{4\pi}{\lambda} d_{desl} + \Phi_{atm} + \Phi_{\beta} + \Phi_{\eta} \quad (6)$$

Mura *et al.* (2021) citam ainda que os erros introduzidos pela componente de fase da atmosfera (Φ_{atm}), por erros na estimativa da linha de base (Φ_{β}) e pelas componentes de ruídos (Φ_{η}) são desprezados na técnica DInSAR clássica, pois para a atenuação dessas componentes de fase, é necessária a análise estatística de uma série temporal de imagens.

2.3.4 PROCESSAMENTO InSAR

Viana (2023) apresenta as etapas básicas sequenciais no processo de obtenção da elevação e deslocamento do terreno a partir do conhecimento da diferença de fase interferométrica.

O processamento InSAR desta forma segue as seguintes etapas:

a) Corregistro das Imagens Interferométricas

O corregistro de imagens de um par interferométrico é um processo fundamental na interferometria SAR (Radar de Abertura Sintética). Ele consiste em alinhar duas imagens de radar adquiridas pelo mesmo sensor (ou sensores semelhantes) em momentos diferentes, para que cada pixel em uma imagem corresponda exatamente ao mesmo local no terreno na outra imagem.

Esse alinhamento é essencial para garantir que as análises subsequentes, como a geração de interferogramas, sejam precisas. Ele é necessário para corrigir diferenças de posição devido a variações na órbita do satélite ou diferenças angulares na aquisição, aumentar a coerência entre imagens e aprimorar a precisão na análise de fase, pois pequenos erros de alinhamento podem levar a desvios na medição da fase interferométrica.

Segundo Mura (1992), o corregistro de imagens SAR consiste no ajuste preciso da grade de pixels de uma imagem escrava (*slave*) a de uma imagem de referência (*master*) (Figura 41). Tradicionalmente, as técnicas para estimar o deslocamento entre cenas estão baseadas na correlação cruzada de imagens de amplitude. No entanto, devido à decorrelação temporal causada por mudanças na superfície entre as aquisições, o grau de correlação pode ser muito baixo, o que implica num corregistro pouco preciso (Xia, 2010). Franceschetti e Lanari (1999) descrevem que um corregistro ruim leva a um aumento do ruído do interferograma.

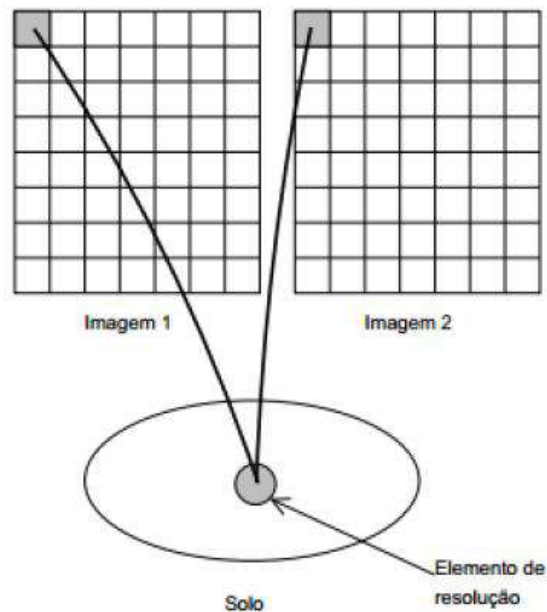


Figura 41 - Corregistro de Imagens

Fonte: Nievinsli (2004)

b) Geração do Interferograma

A geração de interferograma tem por objetivo calcular a diferença de fase entre dois sinais de radar adquiridos de posições ligeiramente diferentes (um par interferométrico). Essa diferença de fase é representada graficamente como um interferograma, que contém informações sobre mudanças na distância do sensor ao terreno e variações topográficas.

Segundo Silva (2010), o interferograma consiste numa imagem que contém informações de fase obtidas pela multiplicação dos valores complexos dos pixels da primeira imagem, chamada de mestre (*master*), pelos conjugados dos valores complexos dos pixels da segunda imagem, chamada de escrava (*slave*). O cálculo computacional da fase interferométrica (equação 7) apresenta um resultado modulado compreendido entre 0 e 2π (fase dobrada).

$$P(x, y) = S_1(X, Y) S_2^*(x, Y) \quad (7)$$

Onde:

$P(x, y)$ representa o valor interferométrico do pixel localizado em (x, y)

S_1 é o valor do pixel na imagem mestre

S_2 é o complexo conjugado do pixel da imagem escrava

c) Geração da Imagem de Coerência

Segundo Burgmann *et al.* (2000), a coerência ou correlação interferométrica é usada para avaliar a qualidade de um interferograma, sendo um conceito chave na análise de imagens de radar de abertura sintética (SAR). A medida do grau de similaridade estatística entre duas imagens SAR complexas é definida pelo coeficiente de correlação complexo, dado por:

$$\gamma = \frac{|\langle C_1 C_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle C_1 C_1^* \rangle \langle C_2 C_2^* \rangle}} \quad (8)$$

Onde γ representa o valor da coerência interferométrica, C_i é a medida de dados complexos da imagem i , $\langle \rangle$ denota média espacial sobre uma área (conjunto de pixels) e o argumento $[\langle C_1 C_2^* \rangle]$ representa o estimador de fase. A coerência, portanto, utiliza uma operação de média espacial móvel a partir de uma janela em torno do pixel que se deseja analisar, e corresponde ao valor esperado da magnitude do interferograma. Portanto, o estimador da coerência será tanto melhor quanto maior a janela.

Franceschetti e Lanari (1999) observam que o valor de coerência se relaciona inversamente com o desvio padrão da fase, estando compreendido entre 0 (incoerente) e 1 (coerente). Em geral, para que a interferometria seja bem sucedida, a coerência deve assumir valores maiores que 0,5.

Já para o *Canada Center for Remote Sensing* – CCRS (1999) a qualidade do interferograma está relacionada com a coerência segundo o Quadro 7.

Quadro 7 - Relação entre coerência e qualidade do interferograma

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

Fonte: CCRS (1999)

A Figura 42 apresenta um exemplo de imagens de coerência interferométrica da região de *Groningen*, norte da Holanda.

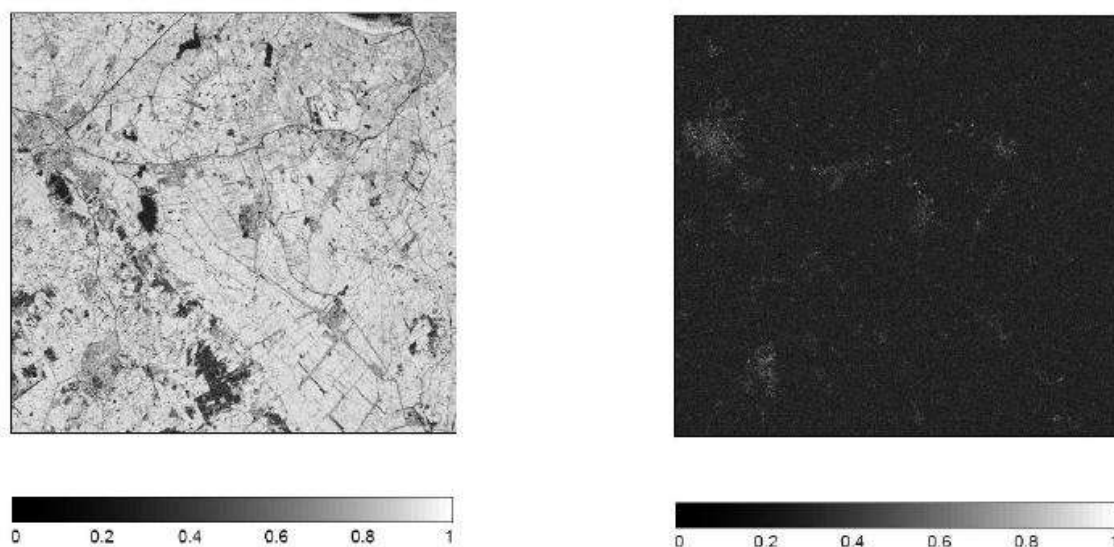


Figura 42 - Imagens de coerência interferométrica da região de *Groningen*, norte da Holanda. À esquerda o intervalo de aquisição entre as imagens do satélite ERS é de aproximadamente um dia, resultando em alta coerência, à direita o intervalo é de 3,5 anos, resultando em baixa coerência (descorrelação temporal). Área da imagem de 50 x 50 km.

Fonte: Adaptado de Usai e Hanssen (1997)

Baixos valores de coerência interferométrica (áreas escuras na imagem) são considerados ruidosos, e associam-se a regiões com água ou vegetação, enquanto altos valores de coerência (áreas claras na imagem) são relacionados a regiões estáveis, como solo exposto, áreas urbanas, afloramentos rochosos, regiões desérticas, etc.

Neto (2005) destaca que existem fatores que influenciam na determinação da estimativa de coerência em pares interferométricos, e entre eles, destacam-se:

- densidade da cobertura vegetal sobre a área de interesse, devido a vegetação sofrer alterações de posição em razão de seu crescimento e da ação do vento;
- regiões com proximidade a massas d'água, em razão da movimentação da lâmina d'água;
- variações no teor de umidade dos alvos (vegetação, solo) da área de estudo, em mudanças climáticas, por exemplo; distâncias entre os satélites (linha de base), sob mesma órbita, ao adquirir as imagens;
- intervalos temporais grandes entre aquisições.

Hanssen (2001) destaca ainda que a coerência interferométrica também pode depender da precisão do coregistro das imagens usadas no cálculo do interferograma. Eles relatam que um coregistro preciso da ordem de $1/8$ do tamanho do pixel preserva cerca de 96% da coerência interferométrica.

d) Remoção da Fase de Terra Plana

O efeito terra plana (*flat earth effect*) está relacionado às franjas interferométricas resultantes da variação linear da fase na direção em alcance (Figura 43), mesmo com a ausência de relevo, devido à visada lateral do sistema SAR. No caso de órbitas paralelas, estas variações aparecem na imagem como franjas alinhadas, dispostas paralelamente a direção de deslocamento da plataforma.

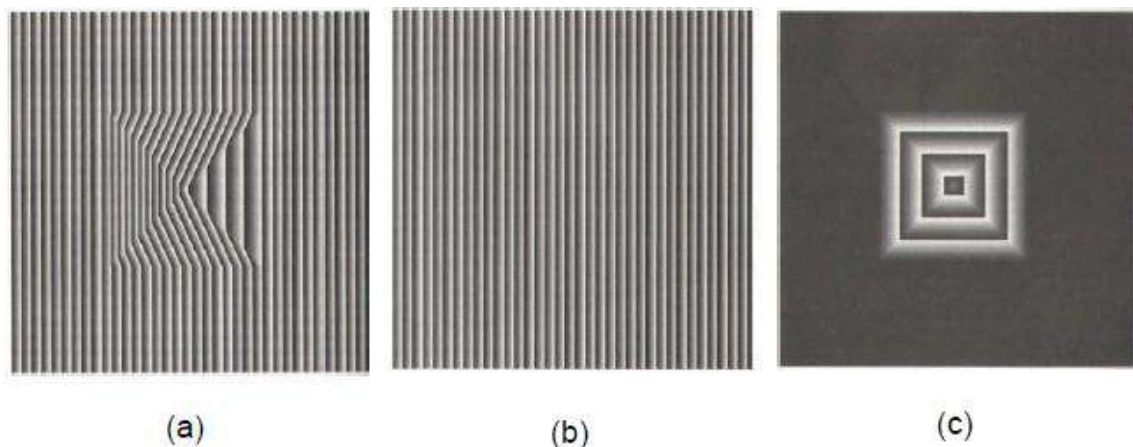


Figura 43 - Correção da terra plana para uma situação hipotética

(a) interferograma bruto para uma área plana, com uma pirâmide no centro da imagem. A direção em alcance aumenta para direita; (b) interferograma terra plana simulado a partir de (a); (c) interferograma corrigido, “a” menos “b”

Fonte: Woodhouse (2006)

A Figura 44 mostra um outro exemplo de remoção da fase de terra plana, onde (a) é o interferograma com a presença da fase de terra plana e (b) com a fase de terra plana removida.

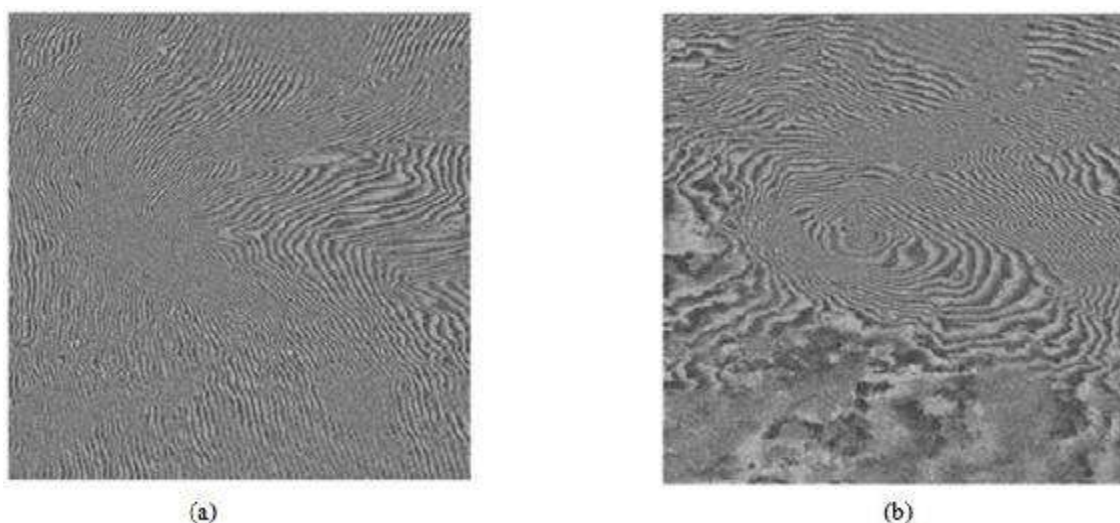


Figura 44 - (a) Interferograma com a presença da fase de terra plana e (b) Interferograma com a fase de terra plana removida

Fonte: Adaptado de Rosa (2004)

e) Redução de Ruídos de Fase

Moore (1983) relata que se o ruído não estivesse presente nos sistemas radares imageadores, a detecção dos alvos seria feita simplesmente pela amplificação do sinal de retorno. No entanto, como isso não ocorre, a potência emitida pela antena deve ser suficiente para superar o ruído. Dependendo da aplicação, a relação sinal-ruído (S/N) requerida pode variar significativamente, em sistemas de telefonia essa relação pode variar entre 20-30 dB, enquanto em televisão é da ordem de 50 dB. Nos sistemas de radares essa relação situa-se entre 12 e 16 dB.

Segundo Ulaby *et al.* (1982), a principal fonte de ruído que provoca distorções radiométricas nas imagens SAR é o *Speckle*, sendo este um ruído multiplicativo (e.g. quanto maior o sinal, maior o ruído) que corresponde a um padrão de textura granulado (tipo “sal e pimenta”) inerente ao sistema radar (por ser um sistema coerente). O *Speckle* pode ser entendido como o resultado da superposição aleatória do sinal refletido por inúmeros refletores (de dimensões comparáveis ao comprimento de onda) contidos no elemento de resolução enquanto o alvo é visto pelo sensor, o que provoca uma variação na amplitude/potência do sinal retroespalhado.

Mura *et al.* (2021) relacionam os possíveis ruídos, além do *Speckle*, encontrados em medições interferométricas:

- Ruído térmico do sistema;
- Descorrelação espacial;
- Processo de registro;
- Descorrelação temporal (no caso de duas passagens); e
- Processamento SAR.

Estes ruídos inerentes ao sistema e à interação radar-superfície alteram a fase do sinal e provocam a degradação da qualidade do interferograma.

Mura *et al.* (2021) e Hartwig (2014) indicam a utilização de filtros para redução dos ruídos, sendo o filtro da média espacial o mais comum. Além do filtro da média, podem ser utilizados outros tipos de filtros com menor perda de resolução espacial, como os filtros de mediana, da moda, e morfológicos.

f) Desdobramento de Fase

Conforme citado anteriormente, a fase interferométrica, devido à sua natureza periódica (cíclica), varia como múltiplos de 2π . De acordo com Hartwig (2014), para que a fase interferométrica possa ser utilizada, é preciso converter a diferença de fase cíclica (relativa) em diferença de fase absoluta, proporcional à diferença em alcance. Este processo é denominado como desdobramento de fase (*phase unwrapping*) e visa a obtenção da elevação do terreno. O desdobramento de fase consiste na adição correta de “n” múltiplos de 2π ao valor de fase medido, sendo uma etapa fundamental no processamento interferométrico com o objetivo de se obter a elevação do terreno.

A Figura 45 apresenta uma ilustração de um interferograma e seu correspondente com a fase desdobrada.

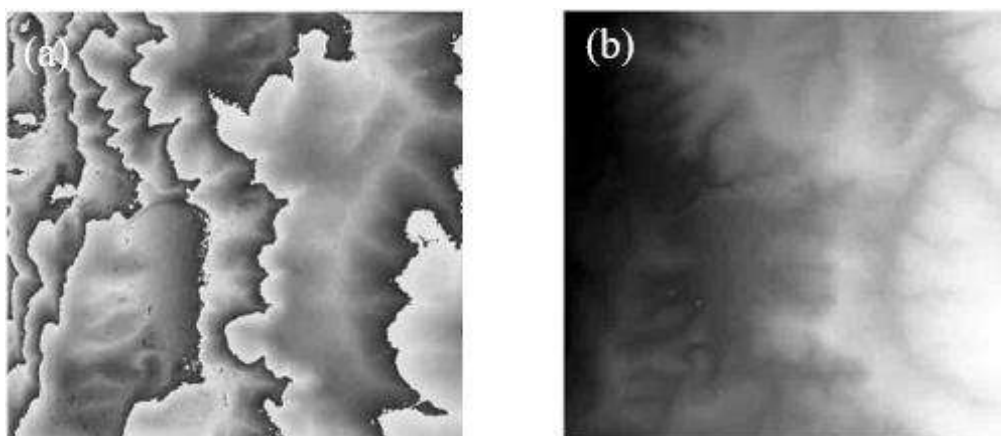


Figura 45 - (a) Ilustração de um interferograma e de (b) seu correspondente com a fase desdobrada

Fonte: Mura *et al.* (2021)

É possível verificar na figura 45 (b) que a fase desdobrada já apresenta os padrões relacionados a uma elevação de terreno.

Mura *et al.* (2021) relatam que os algoritmos para desdobramento de fase podem basicamente ser organizados em dois tipos: os que fazem uso de métodos locais e os que utilizam métodos globais. Os métodos locais caracterizam-se por serem mais precisos, procurando buscar *in loco* os resíduos da fase para isolá-los. Os métodos globais são mais robustos, baseiam-se na integração global dos dados, tentando minimizar o erro global.

g) Geração do Mapa de Deslocamentos

Como visto anteriormente, os valores de fase, expressos em módulos de 2π , estão relacionados com a distância sensor-alvo, e, portanto, mudanças de fase registradas no interferograma SAR podem realçar possíveis variações em alcance.

Segundo Ferretti *et al.* (2007), a variação de fase interferométrica pode ser dividida em três contribuições:

- variação de fase proporcional à altitude relativa do terreno, referida a um plano de referência horizontal;
- variação de fase proporcional à diferença de alcance inclinado (*slant range*) dos alvos;
- variação de fase proporcional ao deslocamento relativo do ponto dispersor.

O mapa de deslocamentos é obtido após o desdobramento de fase e resolução da ambiguidade, o que define, sendo assim uma superfície topográfica. Considerando um modelo de elevação digital (MDE) disponível, o primeiro termo de fase (ou seja, sua contribuição da altitude) pode ser subtraído da fase interferométrica. Esta operação é conhecida como remoção de fase topográfica. Se dados orbitais precisos estiverem disponíveis, o segundo termo de fase também pode ser computado e subtraído da fase interferométrica. Como resultado das duas operações acima, é gerado um mapa de fase proporcional apenas ao deslocamento relativo do terreno.

2.3.5 TÉCNICAS AVANÇADAS DInSAR (A-DInSAR)

De acordo com Hartwig (2014), a tecnologia InSAR compreende duas abordagens principais, que vêm sendo utilizadas com sucesso no monitoramento de taludes: a Interferometria SAR Diferencial (DInSAR - *Differential SAR Interferometry*), ou DInSAR clássica, que é uma técnica que permite detecção de deslocamento entre as aquisições temporais de imagens SAR, e a Interferometria por espalhadores persistentes (PSI - *Persistent Scatterer Interferometry*), que é a técnica baseada na análise de espalhadores persistentes, ou seja, alvos que refletem energia durante todo o período da análise e que são visíveis no conjunto de imagens SAR.

Além destas duas abordagens referenciadas acima, com a evolução das técnicas de processamento, visando principalmente a melhoria da acurácia e da cobertura da abrangência na detecção de fenômenos de deformações superficiais, foram criadas as classes de técnicas denominadas de A-DInSAR, ou técnicas DInSAR avançadas. Fárová *et al.* (2019) observam que as técnicas A-DInSAR podem superar parcialmente as limitações de DInSAR clássica. Técnicas A-DInSAR usam grandes pilhas compostas de muitas imagens SAR coletadas com o mesmo sensor sob a mesma geometria e removem as informações redundantes de diferença de fase, particularmente a contribuição atmosférica. Além da técnica PSI pode-se citar as técnicas SBAS (*Small Baseline Subset*), IPTA (*Interferometric Point Target analysis*) e a técnica SqueeSAR™.

As técnicas avançadas DInSAR serão descritas resumidamente nos itens posteriores. Maiores detalhes podem ser verificados em Mura *et al.* (2021).

a) PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*)

Persistent Scatterer Interferometry (PSI) é uma técnica que usa como base a técnica D-InSAR clássica, porém, emprega uma série de interferogramas diferenciais advindas de uma pilha de imagens SAR devidamente coregrasadas e adquiridas em um intervalo de tempo sobre a mesma área para, de tal modo, selecionar pixels que apresentam um índice de dispersão da amplitude dentro de um limiar estabelecido e, assim, gerar uma série histórica de deslocamento da superfície. Os pixels selecionados devem conter espalhadores persistentes, que são caracterizados por obras de engenharia como pontes, taludes, telhados, casas, prédios, e algumas feições naturais como rochas. Por meio da análise da fase desses pixels, a técnica PSI consegue superar algumas dificuldades encontradas na D-InSAR clássica, tais como, problemas correlacionados com a falta de correlação atmosférica, temporal e espacial. Mura *et al.* (2021) destacam que a técnica PSI buscou sobretudo melhorar a detecção de deformações em regiões de baixa coerência interferométrica.

Desde sua idealização no início dos anos 2000 e devido a sua capacidade de mapear deslocamentos superficiais a uma acurácia milimétrica, a técnica PSI vem sendo amplamente usada em estudos sobre subsidências, deslizamentos, monitoramento de barragens, monitoramento de minas e de estruturas de engenharia de modo geral. Mais tarde, em 2003, a ESA passou, de modo abrangente, a identificar todas as técnicas que visam extrair informação de espalhadores individuais como PSI. Variações tem sido apresentadas por vários autores a partir de então.

A análise dos espalhadores persistentes remete a aspectos referentes à formação das imagens SAR, onde o valor de cada pixel contém a soma coerente dos retornos dos muitos espalhadores do alvo. Caso os espalhadores apresentem movimentos entre si no intervalo entre duas passagens, ocorrerá uma variação aleatória de fase no retorno, causando uma decorrelação dos sinais. Se, assim, um pixel for denominado por um espalhador estável, com sinal de retorno maior que o dos espalhadores restantes, a variância do sinal de retorno devido ao movimento dos espalhadores vizinhos será reduzida, permitindo sua detecção e sua utilização para cálculo de deslocamentos superficiais (Mura *et al.* 2021).

A figura 46 apresenta o comportamento da fase para os espalhadores distribuídos e persistentes.

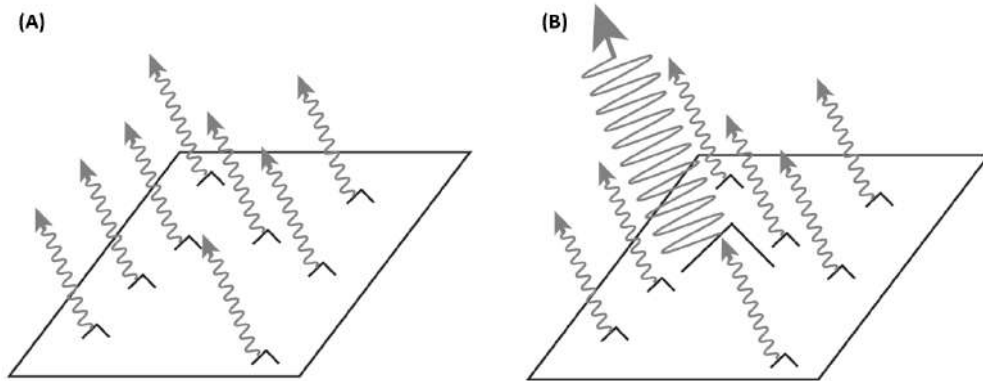


Figura 46 - Ilustração do comportamento da fase para (a) pixel com espalhadores distribuídos e (b) pixel com espalhadores coerentes (persistentes)

Fonte: Hooper (2006)

Ferretti *et al.* (2007) destacam que a técnica PSI utiliza uma multiplicação cruzada, pixel a pixel, entre duas imagens SAR para gerar a fase diferencial. Nesse processo, uma imagem é selecionada como mestre e a outra denominada escrava. Assim, a Figura 47 apresenta um esquema de aquisição de duas imagens SAR sobre uma mesma área de observação e uma pilha de imagens SAR obtidas em um intervalo de tempo ($t_0, t_1, t_2, \dots, t_k$) onde uma destas é selecionada como mestre e as demais são admitidas como escravas e, assim, formam-se os pares interferométricos.

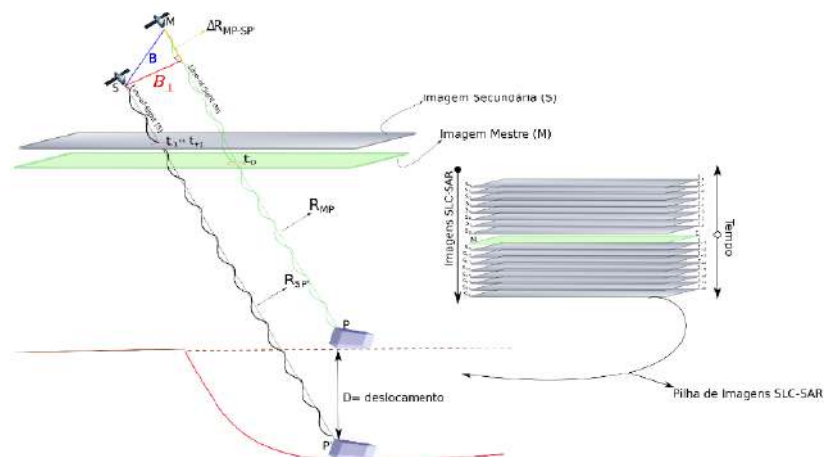


Figura 47 - Representação geométrica da aquisição de duas imagens e de uma pilha de imagens SAR

R_{MP} e R_{SP} representam a distância inclinada entre o sensor e o alvo antes (P) e depois (P') do deslocamento D, respectivamente

Fonte: Alves *et al.* (2023)

Segundo Mura *et al.* (2021) a técnica PSI utiliza um grande número de imagens registradas temporalmente (tipicamente mais de 15), para que seja possível realizar uma análise estatística dos erros de fase relacionados à atmosfera e aos ruídos. Considera-se geralmente a imagem do centro da série temporal como imagem mestre, para que a coerência interferométrica seja, assim, maximizada.

A Figura 48 apresenta um exemplo real de uma configuração de 33 imagens para processamento PSI.

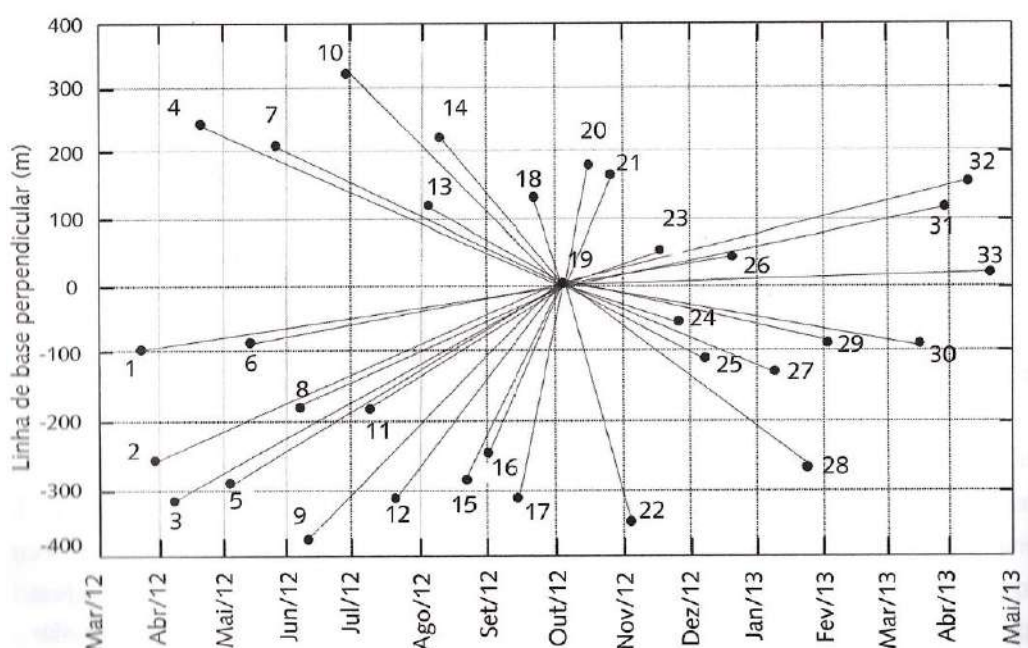


Figura 48 - Exemplo de configuração de interferogramas diferenciais em relação a uma imagem mestre da técnica PSI para 33 imagens do satélite TerraSAR-X coletadas na Província Mineral de Carajás

Fonte: Mura *et al.* (2021)

Mura *et al.* (2021) destacam vantagens e desvantagens da técnica PSI. A alta redundância de dados, que permite obter resultados quantitativos preciso e confiáveis e sua capacidade de cobrir grandes áreas, mais a sensibilidade milimétrica a pequenas deformações na superfície, são algumas das vantagens. As principais desvantagens estão nas limitações operacionais da técnica, como por exemplo à taxa de amostragem da aquisição das imagens, que basicamente depende do período de revisita do satélite utilizado, já que a capacidade de detectar um fenômeno de deformação está diretamente relacionada ao número de imagens

SAR disponível. Outra limitação refere-se à resolução espacial do sensor utilizado, mas esta limitação vem sendo contornada com o surgimento de sensores SAR com período de revisita mais curto e de melhor resolução espacial. Outra limitação importante está relacionada à capacidade de medir deformações ao longo da linha de visada do sensor, impossibilitando detectar deslocamentos puros na direção vertical ou horizontal. Assim, como somente movimentos ao longo da linha de visada do radar podem ser detectados, as deformações detectadas ficam restritas às movimentações da superfície ao longo do plano *slant-range* dos azimutes de visada. Mura *et al.* (2021) observam ainda que o uso combinado de aquisições em órbitas ascendente e descendente é uma maneira de se obter os deslocamentos na direção vertical e horizontal.

Por último, cabe ressaltar que, devido à natureza ambígua da fase, que varia de 0 a 2π , a técnica PSI sofre limitações na capacidade de medir fenômenos rápidos de deformação, que, conforme explicado por Mura *et al.* (2021), como a deformação depende do comprimento de onda (λ) utilizado pelo radar, a fase devida ao deslocamento entre uma aquisição e outra não pode ser maior que π , o que corresponde a um deslocamento máximo de $\lambda/4$, o que seria uma taxa de deformação diferencial da ordem de 42,6cm/ano, tomando-se como referência o satélite Sentinel-1.

b) SBAS (*Small Baseline subset*)

A técnica SBAS utiliza um número redundante de interferogramas diferenciais que apresentem linhas de base curtas. Os interferogramas gerados nesse processo formam uma rede redundante que interliga as imagens de acordo com o intervalo de tempo máximo escolhido entre aquisições e comprimento máximo de linha de base selecionada.

Mura *et al.* (2021) destacam que inicialmente é construído um conjunto de M interferogramas diferenciais, baseados em um conjunto $N+1$ de imagens SAR adquiridas temporalmente, ordenadas de forma $(t_0, t_1, \dots, t_N)$, onde cada par interferométrico diferencial é construído em um dado intervalo de tempo (Δt) seguindo uma regra de curto comprimento das linhas de base e espaço temporal.

Lanari *et al.* (2007) apresentam um diagrama de blocos (Figura 49) e aponta que a técnica SBAS procura satisfazer os seguintes requisitos:

- maximizar a taxa de amostragem temporal dos sinais de deslocamento recuperados usando quase todas as aquisições SAR disponíveis;

- preservar a capacidade do sistema de fornecer mapas de deformação espacialmente densos, que é uma característica fundamental da interferometria DInSAR convencional, explorando pares de dados SAR com valores de linha de base limitados.

Consequentemente, a técnica SBAS permite, através da utilização de interferogramas DInSAR padrão, detectar e seguir a evolução temporal da deformação da superfície com um elevado grau de cobertura temporal e espacial (Lanari *et al.*, 2007).

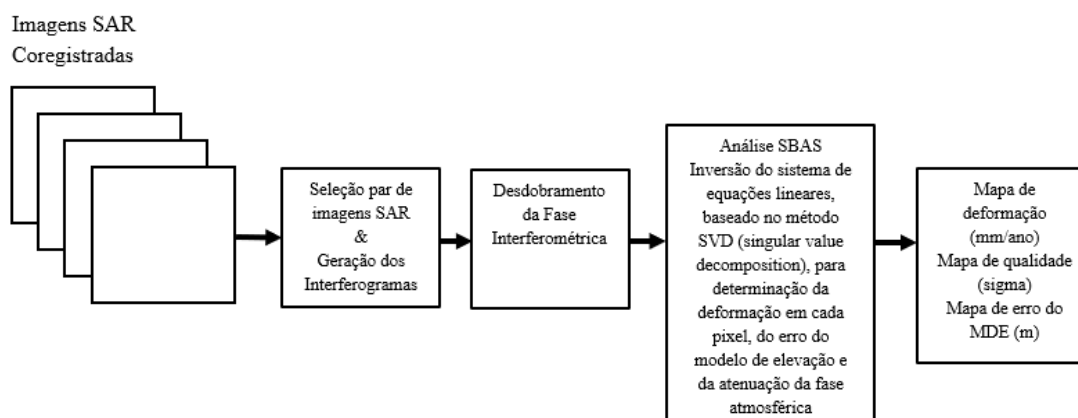


Figura 49 - Diagrama de blocos da técnica SBAS

Fonte: Adaptado de Lanari *et al.* (2007) e Mura *et al.* (2021)

c) IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*)

A técnica *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA) foi primeiramente introduzida por Werner *et al.* (2003), pesquisadores do instituto suíço de pesquisa *Gamma Remote Sensing*.

Ela se concentra na análise de alvos pontuais estáveis (point targets), que são elementos do terreno que mantêm propriedades consistentes de retroespalhamento ao longo de várias imagens SAR adquiridas em diferentes momentos.

Desta forma, o interferograma é interpretado apenas para estes pontos selecionados. Isto ocorre por razões de eficiência e armazenamento de dados, já que estruturas de dados de formato vetorial são usadas em vez do formato de dados raster usado na interferometria convencional. Isso permite uma redução drástica do espaço em disco necessário para processamento.

O modelo de fase utilizado na técnica é o mesmo da interferometria convencional, onde a fase interferométrica é expressa pela soma das fases topográfica, de deslocamento, atmosférica e de ruído.

Mura *et al.* (2021) apresentam uma visão geral da sequência de processamento IPTA (Figura 50).

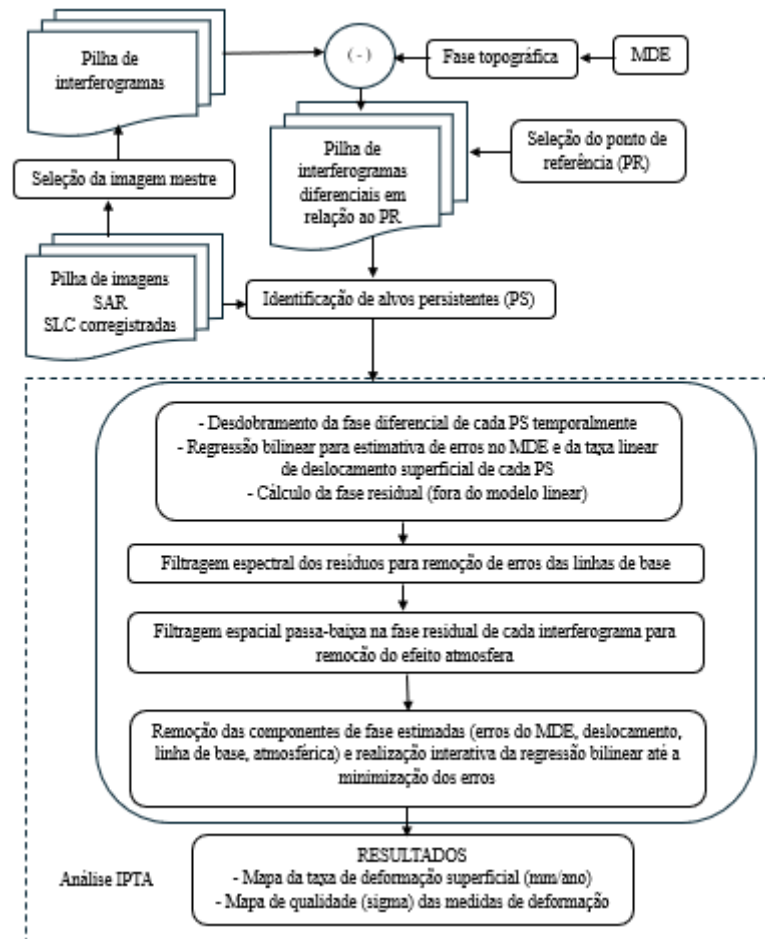


Figura 50 - Fluxograma das etapas principais de processamento da modelagem IPTA

Fonte: Mura *et al.* (2021)

A abordagem da técnica representada na Figura 50 consiste, inicialmente, em aplicar o desdobramento de fase no sentido temporal no vetor de dados de cada alvo pontual. Em seguida, é realizada uma regressão bilinear na fase desdobrada, explorando duas características importantes: a primeira é que as componentes relacionadas ao erro na elevação possuem uma relação linear com as linhas de base (primeira regressão), e a segunda é que se assume que o deslocamento superficial segue um modelo linear de deformação no tempo (segunda regressão).

d) SQUEESAR™

A técnica SqueeSAR é uma técnica patenteada de multi-interferogramas que fornece medições de alta precisão da deformação da superfície do solo sobre o mesmo campo e geometria de aquisição e é um avanço nas técnicas PSI. Ferreti *et al.* (2011) são os pesquisadores que projetaram e propuseram este método chamando de técnica SqueeSAR™. Nesta técnica é possível determinar um número mais significativo de pontos selecionados em áreas não urbanas do que PSI que utiliza como base os Espalhadores Persistentes (PS).

Mura *et al.* (2021) destacam que através desta técnica é possível detectar deslocamentos com a mesma acurácia da análise com PS em regiões com os chamados espalhadores distribuídos (*Distributed Scatterer*, DS), que são os pixels de áreas extensas caracterizados por retroespalhamento menos intenso que os dos PS. Os DS tipicamente correspondem a áreas sem grande cobertura vegetal, como terras não cultivadas, afloramentos dispersos e áreas abandonadas, onde a densidade de PS tende a ser baixa ou ausente.

Conforme mencionado por Ansar *et al.* (2021), a técnica SqueerSAR™ tem por objetivo aumentar a quantidade de pontos selecionados através da utilização do sinal dos PS e DS. Utilizando métodos estatísticos, a técnica aumenta tanto a densidade de alvos escolhidos para processamento interferométrico como a coerência interferométrica.

Mura *et al.* (2021) apontam que o procedimento para determinar os alvos distribuídos (DS) consiste em aplicar um filtro adaptativo que preserve os alvos persistentes (PS) e que seja capaz de calcular a média de pixels estatisticamente homogêneos apenas. Sendo que o elemento-chave do procedimento de filtragem adaptativa espacial é a definição de um teste estatístico capaz de discriminar se dois pixels, pertencentes a uma pilha de dados interferométricos, podem ser considerados estatisticamente homogêneos ou não. Após a identificação de alvos distribuídos (DS) apropriados, estes são tratados com o mesmo procedimento de processamento interferométrico de alvos pontuais (PS).

Mura *et al.* (2021) apresentam ainda um fluxograma do processamento da técnica SqueerSAR™ a partir de uma pilha de imagens SAR devidamente corregistradas no formato SLC (Figura 51).

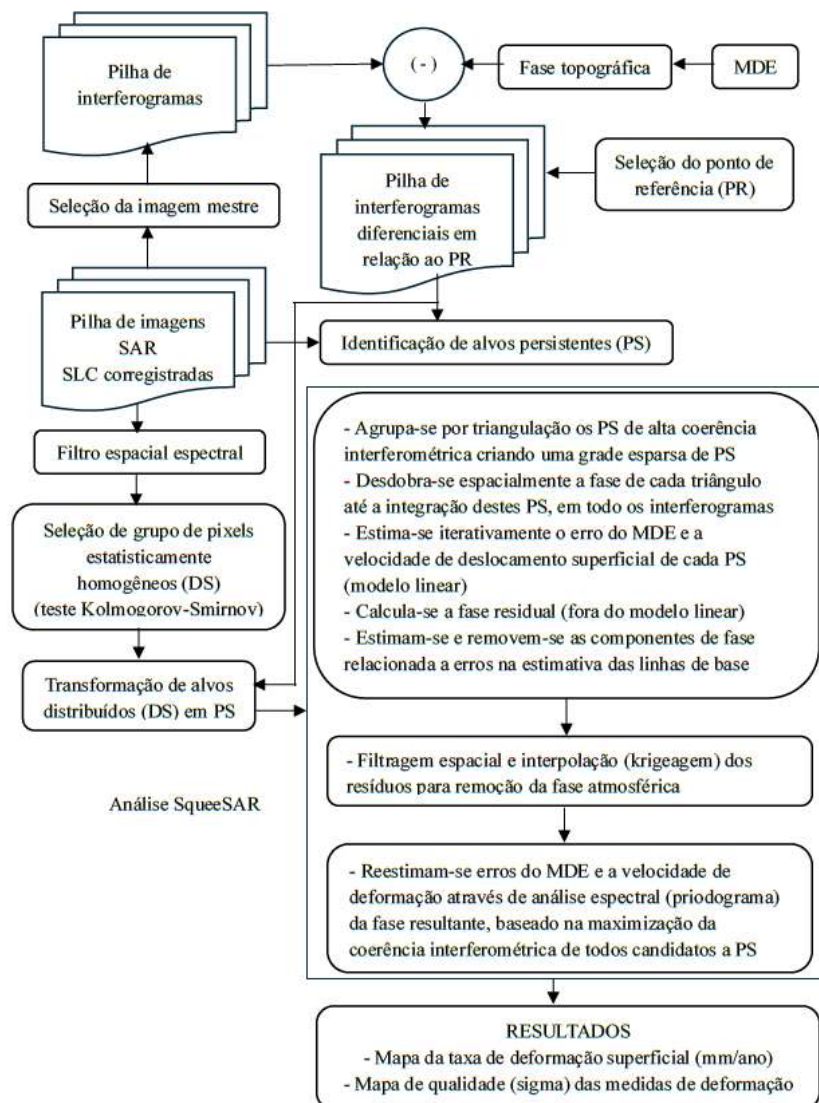


Figura 51 - Fluxograma da modelagem de processamento da técnica SqueeSAR™

Fonte: Mura *et al.* (2021)

Por último, Ansar *et al.* (2021) apresentam algumas vantagens e desvantagens da técnica SqueeSAR™.

Segundo Ansar *et al.* (2021), a técnica SqueeSAR™ é adequada para áreas não urbanas. No entanto, cada método tem suas limitações e pontos fortes. Ferreti *et al.* (2012) desenvolveram a técnica SqueeSAR para superar o problema enfrentado pelas técnicas PSI originais. Uma das vantagens dessa técnica é a exploração de sinais de pontos DS e PS para aumentar a densidade espacial de pontos de medição no espaço, especialmente em áreas rurais. A diferença entre essa técnica e outras técnicas é sua estabilização com o sinal DS, reduzindo

o ruído de fase. Depois dessa estabilização, DS e PS são processados juntos para estimar a série temporal de deformação. Como desvantagens pode-se citar a necessidade de uma alta demanda computacional para processamento, uma dependência de dados de alta qualidade o que provoca um menor desempenho em regiões com dados limitados ou interferogramas ruidosos, uma sensibilidade à ruídos, o que provoca uma menor precisão em áreas com mudanças rápidas na superfície, e sua complexidade de interpretação, principalmente pela dificuldade de diferenciar DS de ruídos ou anomalias.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Foram usadas duas abordagens interferométricas neste trabalho, a técnica clássica de interferometria diferencial (DInSAR clássica) e a técnica PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*).

Para realização da pesquisa foram seguidas as seguintes etapas, contidas no fluxograma da Figura 52.

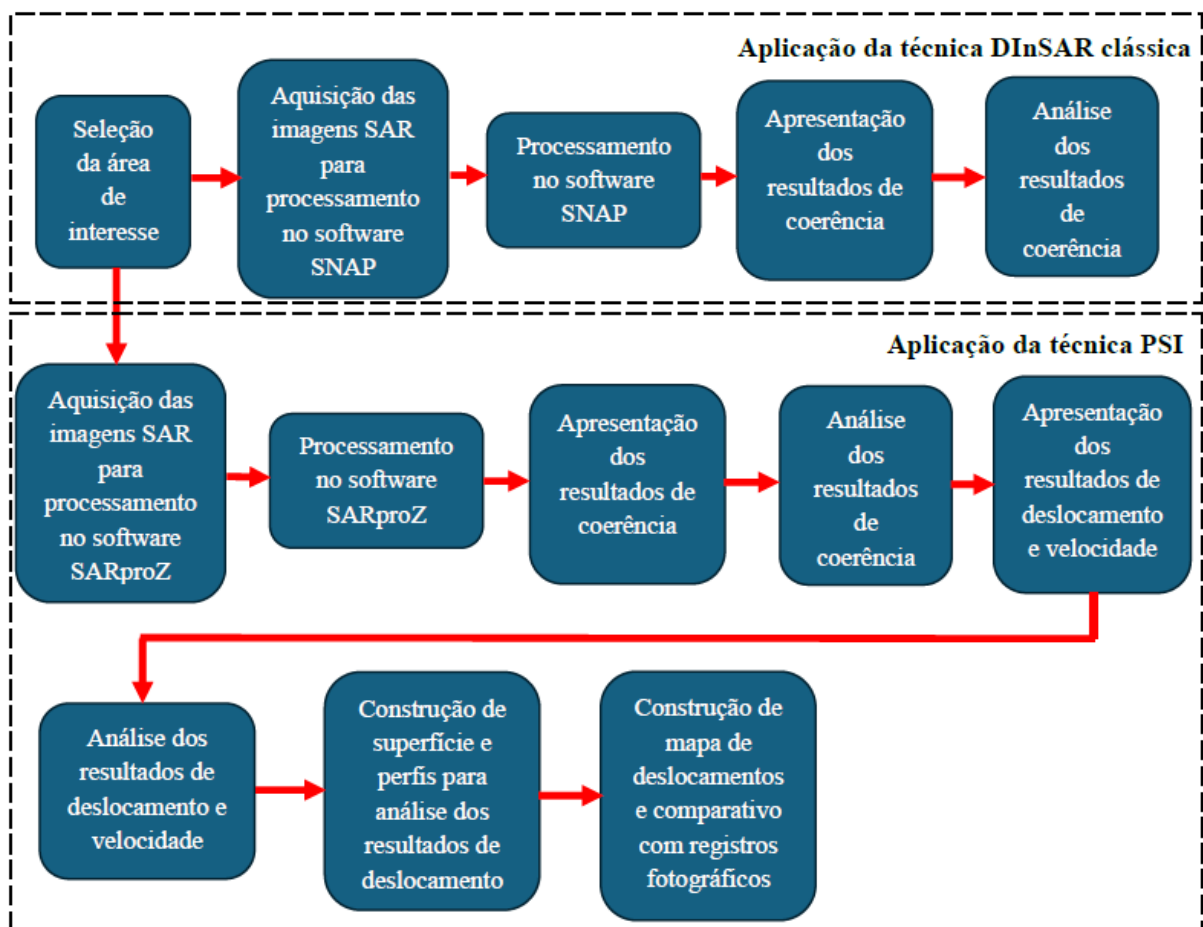


Figura 52 - Fluxograma de etapas de realização da pesquisa

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.1 APLICAÇÃO DA TÉCNICA DInSAR CLÁSSICA

Primeiramente foi utilizada a técnica DInSAR clássica para verificação das medidas de coerência na área de estudo e, assim, confirmar a viabilidade da medição dos deslocamentos por esta técnica. A verificação inicial da coerência interferométrica se deu em função da área de estudo se localizar em região pouco urbanizada e em função das medidas de coerência poderem afetar a qualidade do interferograma e consequentemente a confiabilidade das medidas de deslocamento, conforme já citado por *Canada Center for Remote Sensing – CCRS* (1999). Os itens a seguir descrevem as etapas da aplicação da técnica DInSAR clássica.

3.1.1 OBTENÇÃO DAS IMAGENS SAR

Foram utilizadas, para aplicação de ambas as técnicas, imagens do satélite Sentinel-1, uma das missões espaciais da Agência Espacial Europeia (*European Space Agency - ESA*).

O programa Sentinel da ESA é uma iniciativa pioneira que visa monitorar e proteger o planeta de maneira abrangente e sustentável. Utilizando uma frota de seis missões de observação da Terra, o Sentinel fornece uma ampla gama de dados e imagens, radar e sensores multiespectrais, que são cruciais para monitorar mudanças ambientais, gerenciar recursos naturais, monitorar desastres naturais e apoiar uma variedade de aplicações em áreas como agricultura, monitoramento da saúde dos ecossistemas marinhos e previsão meteorológica. Esses satélites trabalham em conjunto com outros sistemas de observação terrestre, fornecendo informações em tempo quase real e contribuindo para uma melhor compreensão e gestão do planeta.

O presente trabalho se limitou ao programa Sentinel-1, que é uma missão de imagem por radar em órbita polar, que opera sob qualquer clima e durante o dia e a noite. O Sentinel-1A foi lançado em 3 de abril de 2014 e o Sentinel-1B em 25 de abril de 2016. A missão do Sentinel-1B terminou em 2022 por problemas operacionais e por este motivo serão utilizadas apenas imagens do programa Sentinel-1A.

Segundo a ESA, a missão Sentinel-1 (Figura 53) compreende uma constelação de dois satélites (1A e 1B) em órbita polar heliosíncronos, compartilhando o mesmo plano orbital com diferença de fase orbital de 180°, operando dia e noite, realizando imagens de radar de abertura sintética em banda C, permitindo a aquisição de imagens independentemente das

condições climáticas. A missão opera em quatro modos exclusivos de imagem, com diferentes resoluções (até 5 m) e coberturas (até 400 km).

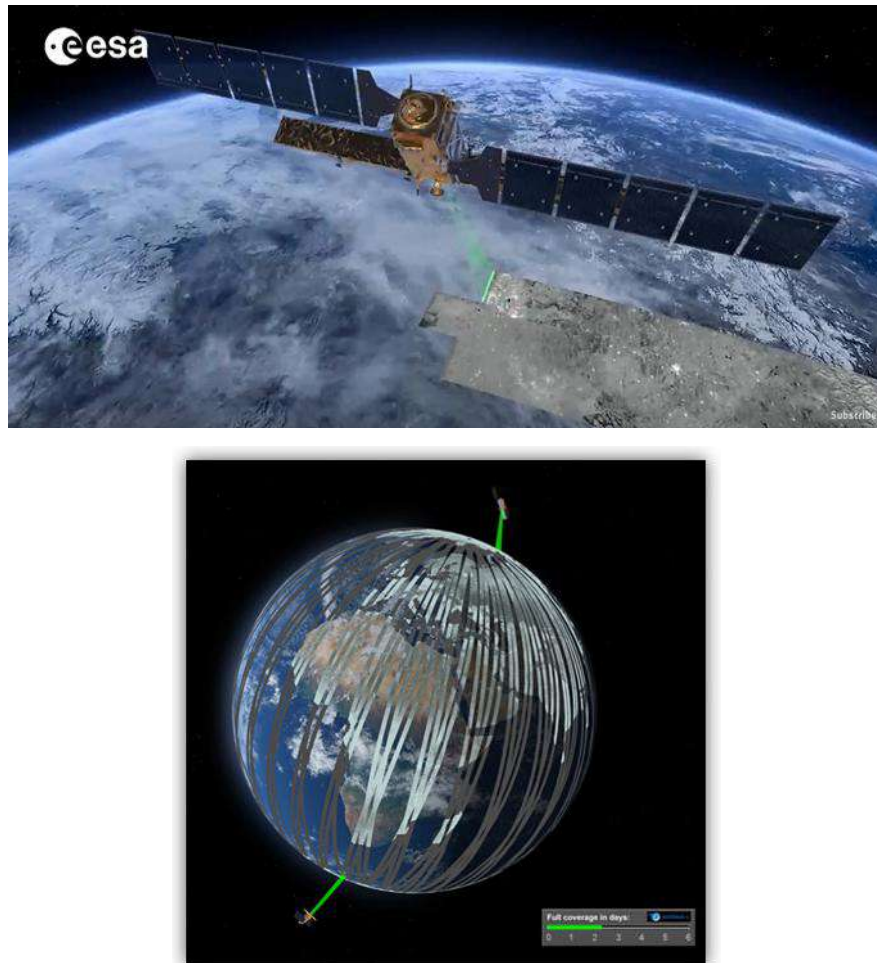


Figura 53 - (a) Satélite Sentinel e (b) Constelação Sentinel

Fonte ESA (2025)

O satélite Sentinel-1 possui órbita polar e um ciclo de 12 dias e 175 órbitas por ciclo. Seus sensores operam na banda C, com comprimento de onda de 5,6 cm, e possuem modos de dupla polarização HH/HV ou VV/VH e polarização única HH ou VV. Além disso possui quatro modos de aquisição distintos: SM (*Stripmap Mode*), IW (*Interferometric Wide Swath Mode*), EW (*Extra-Wide Swath Mode*) e WV (*Wave Mode*) como pode ser observado na Figura 54.

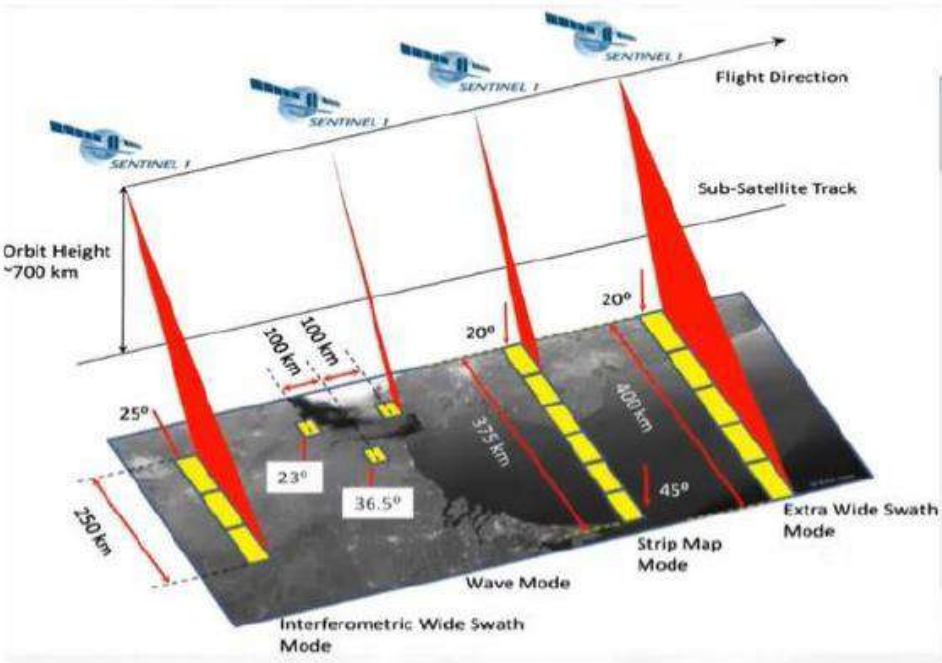


Figura 54 - Configuração dos Diferentes Modos de Aquisição do Sentinel-1

Fonte: ESA (2025)

O Quadro 8 apresenta os demais parâmetros dos modos de aquisição da missão Sentinel-1.

Quadro 8 - Parâmetros dos modos de aquisição da missão Sentinel-1

Modo	Ângulo incidente	Resolução espacial	Largura de faixa	Polarização
Strip map	20° - 45°	5 x 5 m	80 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
Interferometric wide	29° - 46°	5 x 20 m	250 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
Extra wide	19° - 47° 22° - 35°	20 x 40 m	400 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
Wave mode	35° - 38°	5 x 5 m	20 x 20 km	HH, VV

Fonte: ESA (2025)

Cada imagem SAR no modo IW é composta por faixas (IW1, IW2 e IW3) e subfaixas (1 a 9) de imageamento, sendo possível a escolha das faixas de interesse para o processamento no *software* utilizado (Figura 55).

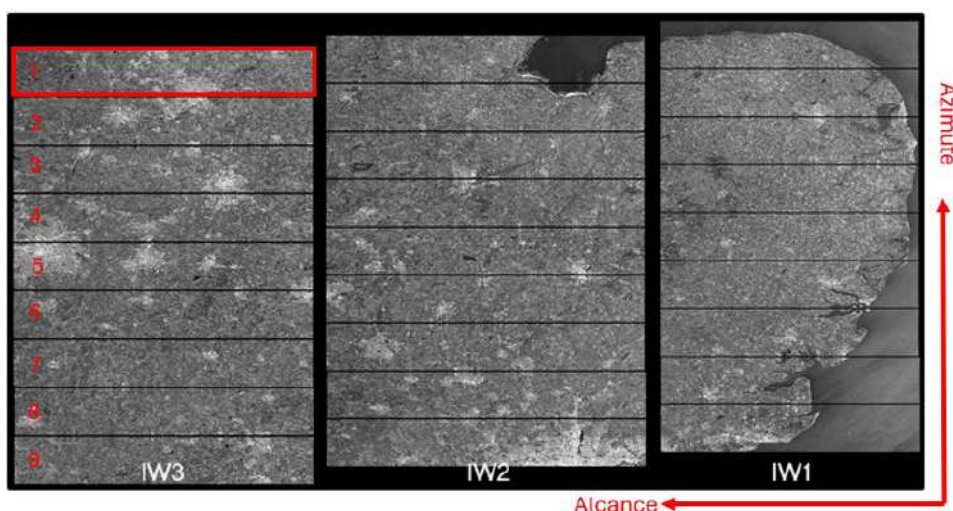


Figura 55 - Faixas de Imageamento do Sentinel-1

Fonte: ESA (2025)

Para aplicação da técnica DInSAR clássica separou-se 14 imagens SAR obtidas através da ferramenta de busca da Instalação de Satélite do Alasca (*Alaska Satellite Facility - ASF*), instalação vinculada à Universidade do Alasca, Estados Unidos. A ASF disponibiliza imagens de radar de diversos satélites e, conforme já citado foi escolhida a utilização das imagens obtidas pelo programa Sentinel-1, da ESA, devido à facilidade de processar estas imagens no *software* de código aberto SNAP (*Sentinel Application Platform*).

Para escolha das imagens foi definido como período de análise os meses de Junho de 2019 a Junho de 2020 com objetivo de realizar a avaliação dos 12 meses anteriores a constatação, a partir de inspeções visuais, de considerável movimentação do maciço.

Todas as imagens possuem formato SLC (*Single Look Complex*) em órbita descendente, modo de polarização VV e modo de aquisição *Interferometric Wide Swath* – IW. Segundo Viana (2023), as imagens em formato SLC possuem um nível de processamento que mantém a informação de fase do sinal e é essencial para a técnica de interferometria, pois elas preservam as informações de fase e amplitude, necessárias para medir mudanças de distância entre o sensor e a superfície com alta precisão.

Essas imagens permitem a geração de interferogramas, cálculos de deformação de superfície e a análise de eventos geológicos.

A área de imageamento SAR que contém a área de estudo é apresentada na Figura 56.



Figura 56 - Área de extensão da imagem SAR

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A partir desta extensão de área foram seleccionadas as faixas e subfaixas de interesse, Figura 57.

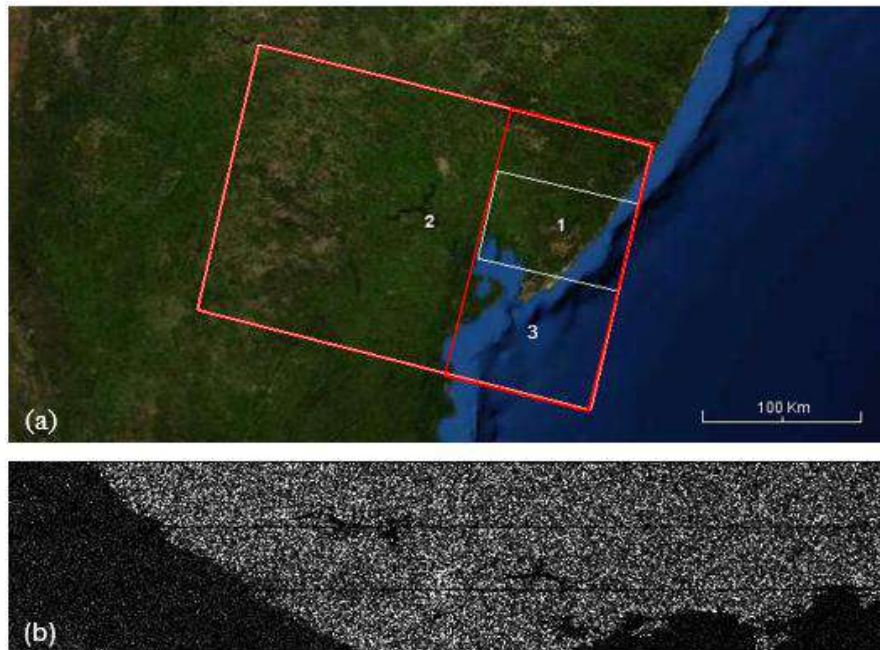


Figura 57 - (a) Faixas e subfaixas de imageamento da região de interesse do presente estudo

1- subfaixas 3, 4 e 5; 2- Imagem SAR; e 3- Faixa IW1

(b) Intensidade de sinal na polarização VV para as subfaixas 3, 4 e 5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.1.2 O PROCESSAMENTO DInSAR

Foi utilizado para análise das imagens SAR o programa de código aberto SNAP (*Sentinel Application Platform*). Este *software* foi desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA) e consiste em uma coleção de ferramentas de processamento, leitores e gravadores de produtos Sentinel e de outras missões SAR, como ERS-1 e 2, ENVISAT, TerraSAR-X, dentre outros (ESA, 2025). A versão utilizada foi a 8.0.

Conforme observado anteriormente, o processamento interferométrico foi inicialmente feito com o objetivo de calcular a coerência interferométrica entre os pares de imagem.

O programa possui uma função para a criação de uma rotina para processamento dos pares em lote. As tarefas de cada etapa que compõe o processamento são representadas através de operadores. Estes operadores recebem uma configuração inicial dos parâmetros compatíveis com o objeto em análise e uma vez interligados geram os seus produtos. Cada etapa de processamento será apresentada mais detalhadamente nos próximos parágrafos.

A Figura 58 apresenta um fluxograma para configuração das etapas de processamento.

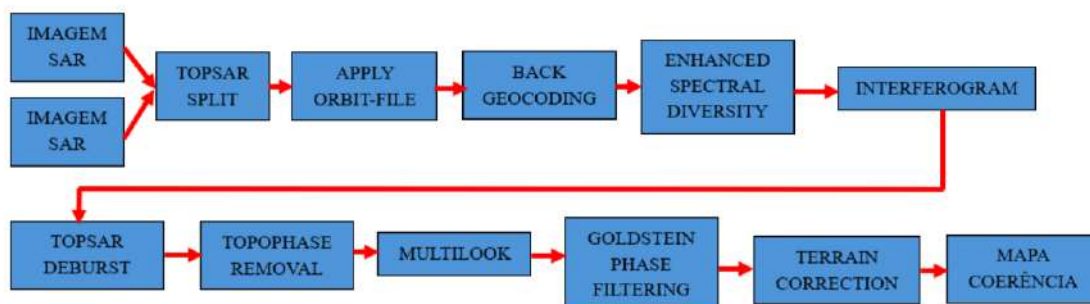


Figura 58 - Fluxograma de processamento para geração dos mapas de coerência

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Após a obtenção das imagens, foi iniciado o processamento pela etapa *TOPSAR-Split*. Esta etapa tem por objetivo diminuir a quantidade de dados a ser processado através da definição mais detalhada da área a ser analisada. Com este operador é definida a faixa e as respectivas subfaixas que abrangem a área a ser estudada. No caso da área analisada neste trabalho será utilizada a faixa IW1 e as subfaixas 3, 4 e 5, conforme já apresentado na Figura 57.

Continuando o processamento, o operador “*APPLY-ORBIT-FILE*” aplica os arquivos de órbita, disponibilizados pela ESA, nas imagens processadas para fornecer informações precisas de posição e velocidade do satélite no momento de aquisição das imagens.

Com o operador “*BACK-GEOCODING*” é necessário a definição dos pares interferométricos para executar o coregistro e geocodificação das imagens, admitindo-se uma imagem escrava em relação a uma imagem principal (mestre). Neste operador também é definido o MDE (Modelo Digital de Elevação) que será utilizado em todo processamento, que no presente trabalho foi utilizado o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), missão espacial realizada pela NASA com o objetivo de coletar dados de radar para criar Modelos Digitais de Elevação (MDE) da Terra.

Este operador realiza o cálculo da projeção no caminho do satélite no MDE e considera as coordenadas tridimensionais dos pontos no solo, a partir da referência geográfica e o caminho de simulação do sensor descritos nas imagens formadas.

Para processamento das imagens para a técnica DInSAR clássica foram utilizadas duas imagens mestre para cada ano avaliado, uma para o ano de 2019 e outra para o ano de 2020. As demais imagens foram consideradas escravas, produzindo-se um total de 12 pares interferométricos.

A Tabela 1 apresenta os pares interferométricos selecionados para a análise. Observa-se que o nome de cada par interferométrico é constituído de duas datas (formato de data: ano, mês e dia) sendo que a esquerda se localiza a data da imagem mestra e a direita a respectiva imagem escrava.

Tabela 1 - Pares interferométricos selecionados para análise

Pares interferométricos	
2019	
20190611	20190623
20190611	20190717
20190611	20190822
20190611	20190927
20190611	20191021
20190611	20191126
20190611	20191220
2020	
20200113	20200218
20200113	20200313
20200113	20200430
20200113	20200524
20200113	20200617

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Após o coregistro inicial realizado na etapa “*BACK-GEOCODING*” é preciso continuar o fluxo de trabalho de coregistro na etapa conhecida como ESD (*Enhanced Spectral Diversity*). Este operador realiza o coregistro conjunto de uma pilha Sentinel-1 criando uma rede de imagens e, em seguida, estimando os deslocamentos de alcance e azimute, corrigindo esses dados para cada faixa. O objetivo é aumentar a coerência interferométrica, refinar o alinhamento entre as faixas SLC e melhorar a precisão da geração de interferogramas e, consequentemente, dos produtos derivados como mapas de deslocamento ou elevação (DEM).

O operador “*INTERFEROGRAM*” calcula um interferograma (complexo) que representa a diferença de fase entre a imagem mestre e a imagem escrava. Além disso são geradas as imagens de intensidade média entre mestre e escrava e o mapa de coerência entre as duas imagens.

O modo IW do Sentinel-1 utiliza a técnica TOPSAR (*Terrain Observation with Progressive Scans SAR*). Nela, cada faixa IW é adquirida por vários “*bursts*”, que são pequenas janelas temporais de captura, deslocadas no tempo para cobrir uma faixa larga.

Essas *bursts* têm pequenas sobreposições, e após o coregistro e formação do interferograma, as imagens ainda estão separadas por esses limites. Com isso cria-se

descontinuidades, impede-se o uso contínuo da imagem e afeta-se a fase posterior de desempacotamento de fase.

Para poder reconstruir cada faixa IW como imagem contínua, unificando os trechos individuais capturados sequencialmente pelo radar é utilizado o operador *TOPSAR DEBURST*.

A Figura 59 apresenta um exemplo de utilização do operador “*TOPSAR DEBURST*”.

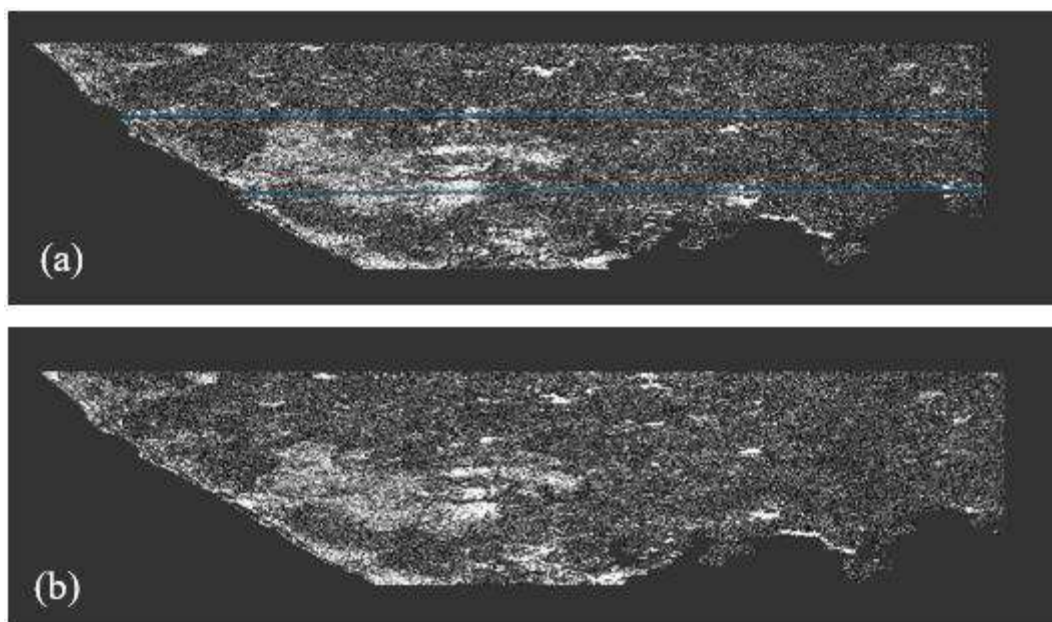


Figura 59 - Exemplo de utilização do operador *TOPSAR DEBURST*

a) antes b) depois

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Dando continuidade à cadeia de processamento, são utilizados os operadores “*TOPOPHASE-REMOVAL*” para remoção da Terra plana, “*MULTILOOK*” que é utilizada para reduzir o ruído speckle e gerar imagens com pixels mais quadrados, “*GOLDSTEIN PHASE FILTERING*” para filtragem e suavização dos ruídos temporais e geométricos e, finalmente, o operador “*TERRAIN CORRECTION*” para corrigir distorções geométricas nas imagens causadas pelo relevo do terreno e pela geometria do sensor SAR, e para georreferenciar corretamente a imagem em um sistema de coordenadas conhecido (UTM ou geográficas). Sendo assim o processo que transforma a imagem SAR — originalmente em coordenadas de alcance (*range*) e azimuth — para uma imagem ortorretificada, com coordenadas geográficas reais.

Com o processamento DInSAR foi possível gerar mapas de coerência e tabelas com a composição dos pares interferométricos, linhas de base (perpendiculares e temporais) e as respectivas medidas de coerência para pontos previamente selecionados no talude de estudo. Estes resultados serão apresentados no Capítulo 5.

3.2 APLICAÇÃO DA TÉCNICA PSI (A-DInSAR)

Conforme foi visto anteriormente, a técnica PSI (*Persistent Scattering Interferometry*) é uma técnica avançada de Interferometria Diferencial (A-DInSAR) e será utilizada neste trabalho em função da técnica de interferometria diferencial clássica ter gerado resultados de coerência de baixa qualidade para a área de estudo.

Fárová *et al.* (2019) observam que ao utilizar frequências na banda C, a baixa coerência é a principal limitação para utilização da interferometria clássica. Apesar disso, vários estudos têm demonstrado o potencial dos dados da banda C do Sentinel-1 para monitorar a deformação do solo associada a deslizamentos. Ainda que para áreas com vegetação possa ser desafiador usar dados deste satélite.

Dando continuidade a utilização prática da técnica de Interferometria Diferencial (DInSAR) será apresentado a seguir uma segunda abordagem, agora utilizando um *software* comercial, que utiliza uma técnica PSI robusta, combinando um grande número de imagens SAR, reduzindo assim possíveis erros.

Para aplicação da técnica PSI foi escolhido o *software* SARproZ devido à sua capacidade de processar dados de séries temporais longas com diferentes abordagens DInSAR e de poder encontrar deslocamentos em áreas onde espalhadores persistentes (PS) são poucos, característica comum de áreas com vegetação.

Embora esta segunda abordagem venha a recorrer a um *software* comercial, procurou-se manter a utilização dos dados Sentinel-1, fornecidos gratuitamente pela ESA.

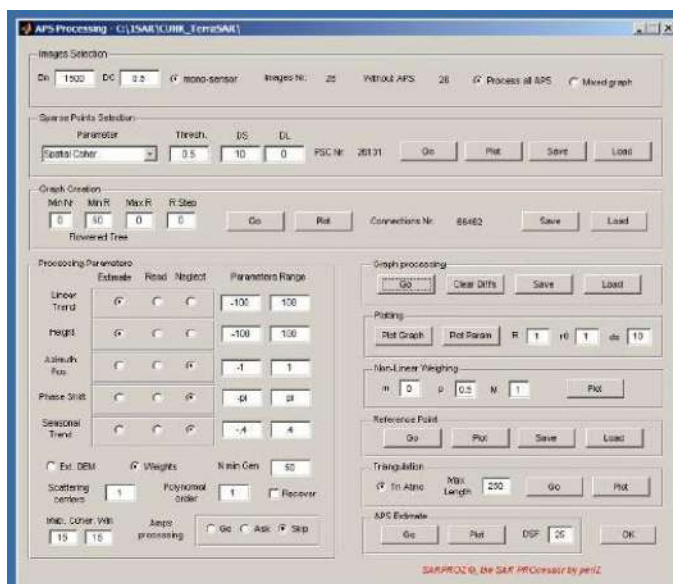


Figura 61 - Exemplo da aplicação do módulo de estimativa APS no SARproZ

Fonte: Perissin *et al.* (2011)

3.2.1 ETAPAS DO PROCESSAMENTO PSI

Para o processamento da técnica PSI foi utilizada uma quantidade maior de imagens (20 imagens). Esta quantidade maior de imagens é necessária devido às características das imagens geradas em satélites que utilizam banda C e para se obter resultados adequados (Fárová *et al.*, 2019; Yudinugroho e Rokhmana, 2021).

O formato das imagens SAR foi o mesmo utilizado na abordagem da Interferometria Diferencial clássica, Sentinel-1 formato SLC (*Single Look Complex*) em órbita descendente, modo de polarização VV e modo de aquisição *Interferometric Wide Swath* – IW.

Para definição dos pares interferométricos foi utilizada a configuração gráfica em estrela (Figura 62), onde cada ponto indica uma imagem e cada conexão um interferograma. Nesta configuração, as conexões garantem uma continuidade temporal das medições de deformação e, portanto, a possibilidade de realizar o desdobramento de fase da série temporal.

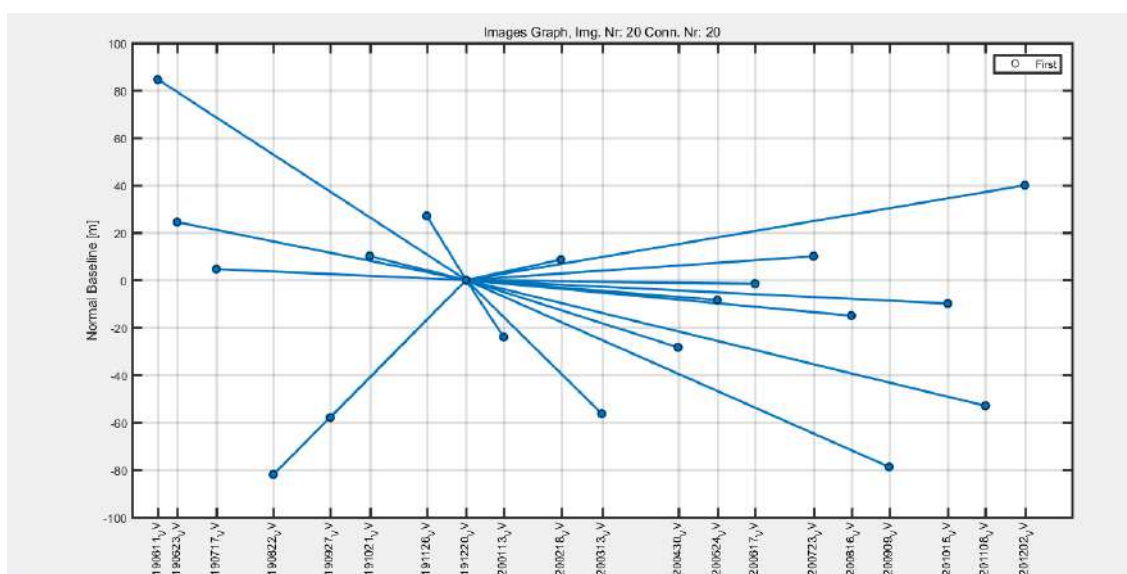


Figura 62 - Configuração estrela para aplicação da técnica PSI

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na configuração em estrela a imagem de 20/12/2019 foi apontada como mestre neste conjunto de dados. Esta indicação se deu em função da maximização da coerência da pilha de imagens, que é uma função das linhas de base temporais e perpendiculares, bem como da frequência do centróide Doppler (Kampes, 2005). Além disso, Fárová *et al.* (2019) observam que é muito importante que a imagem escolhida como mestre tenha sido adquirida em condições de tempo bom, sem chuva, e que deva possuir uma posição adequada (aproximadamente no meio) com relação à configuração gráfica estrela, considerando as linhas de base temporais e perpendiculares. Para confirmar a definição da imagem de 20/12/2019 como imagem mestre, foram consultadas as séries históricas de chuva disponibilizadas pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).

A técnica PSI mede a deformação da superfície ao longo de meses ou anos, removendo os efeitos da atmosfera, topografia e ruído do sinal. O PSI explora interferogramas com uma única cena mestre (Figura 62). Nesta técnica, apenas os pixels coerentes com fase ou amplitude estáveis são processados. Apesar do número de alvos persistentes poder ser baixo em áreas com vegetação, e consequentemente baixa coerência, a técnica PSI se mostrou mais adequada para medições de deformação neste tipo de superfície. Segundo Kumar *et al.*

(2020), a metodologia utilizada pelo programa SARproZ tem a capacidade de encontrar deformação sobre as áreas onde os alvos persistentes são poucos.

Para aplicação da técnica PSI utilizando-se o programa SARproZ, seguiu-se as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 63.

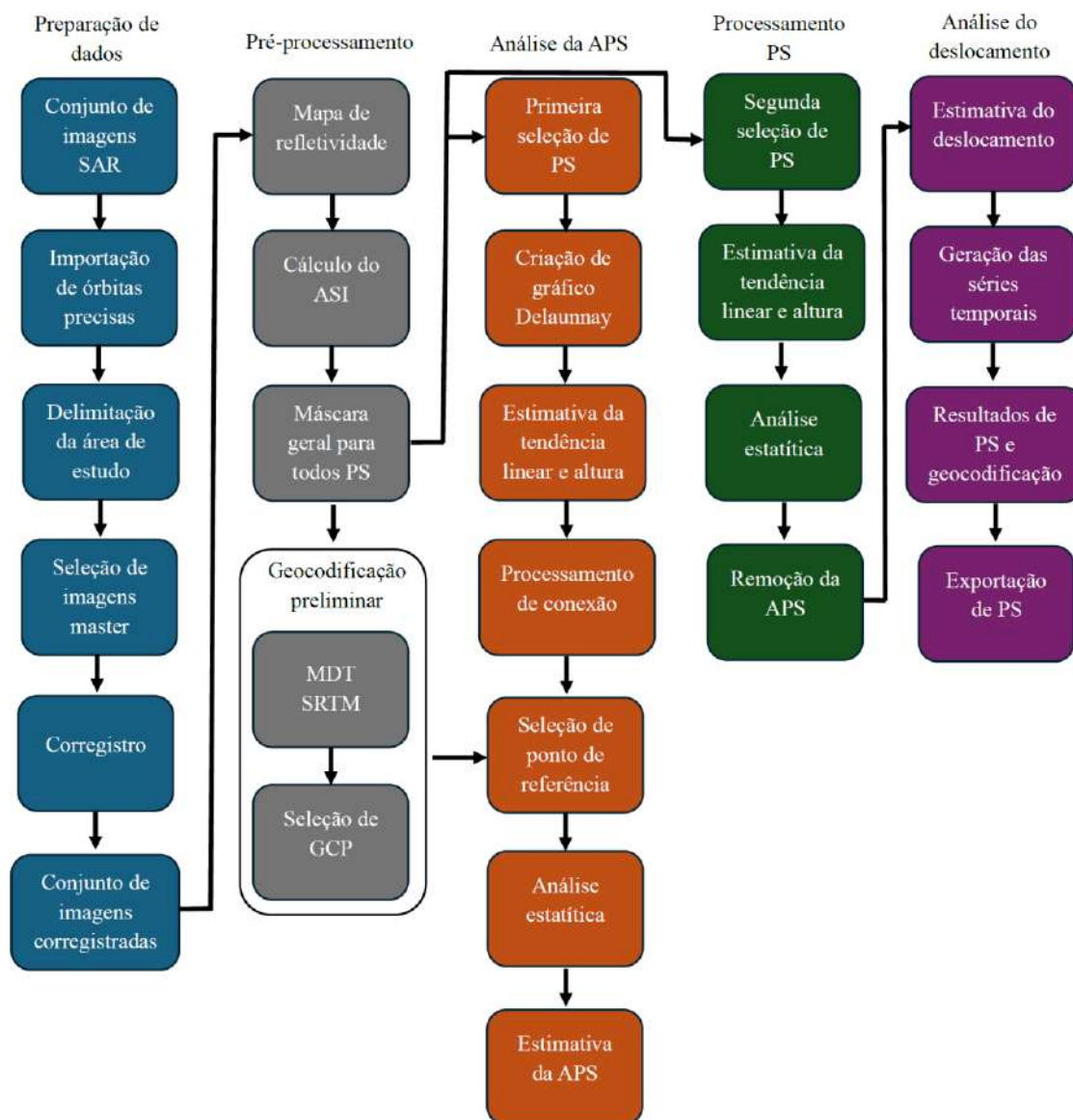


Figura 63 - Fluxograma de processamento InSAR no SARproZ

Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2024)

Utilizando a pilha de 20 imagens, foi iniciada a etapa de preparação dos dados, com a delimitação da área de estudo e definição da imagem mestre, em que o SARproZ indica automaticamente a melhor imagem da pilha a ser considerada como mestre. Assim, em

seguida, as imagens mestre e escravas são todas extraídas e coregistradas com base em órbitas de precisão e no modelo digital de elevação (SRTM) com resolução de 1 segundo de arco (30m).

Na etapa de pré-processamento se destaca o processamento do Índice de Estabilidade de Amplitude (ASI). A amplitude em imagens SAR descreve ondas compostas por sinais complexos, contendo magnitude e fase. No SARproZ este índice é utilizado para selecionar os candidatos a espalhadores persistentes (PSC). Além disso, o ASI atua nos processos de Análise da Fase Atmosférica (APS) e de geocodificação. O ASI é calculado com a Equação 9:

$$ASI = 1 - D_A = 1 - (\sigma_A/m_A) \quad (9)$$

Em que D_A representa a dispersão de amplitude, m_A é o desvio padrão da amplitude no tempo e σ_A é o desvio padrão da amplitude no tempo. Souza (2022) destaca que ao calcular o índice de dispersão para cada pixel os candidatos a pontos PS podem ser selecionados.

Razi *et al.* (2018) observam que os pontos PS são selecionados se a dispersão de amplitude for $D_a < 0,25$ para área urbana e $D_a < 0,4$ para áreas com vegetação, sendo este o valor utilizado para esta etapa.

Para a área de estudo apenas um pequeno número de espalhadores persistentes (PS) atingiu este parâmetro, contudo, esta condição é necessária para a correta Análise da Fase Atmosférica (APS). Desta forma, apenas estes poucos pontos foram escolhidos para processamento nas etapas posteriores.

Após fazer uma primeira seleção dos candidatos a espalhadores persistentes (PSC), cada ponto próximo é conectado ao outro, referindo-se a um único ponto de referência. Estas conexões seguem o algoritmo de triangulação de Delaunay e assim é criada uma rede mais redundante para melhorar a capacidade de detectar erros de ambiguidade de fase e a robustez da rede. Após a triangulação, a fase atmosférica pode ser removida e em seguida os espalhadores persistentes (PS) nas séries temporais são obtidos.

Desta forma, a velocidade de deformação diferencial e o erro topográfico residual diferencial são computados para cada aresta da triangulação Delaunay. Então, o modelo linear estimado (velocidades de deslocamento linear e altura residual) é subtraído e a Análise da Fase Atmosférica (APS) é estimada a partir dos resíduos de fase por inversão de gráfico. Durante esta etapa, é necessário fixar o valor da velocidade de pelo menos um pixel, chamado

de ponto de referência, que pode ser caracterizado como um ponto com alta coerência temporal e que foi responsável por medir o movimento relativo InSAR.

Na próxima etapa, Processamento PS, ocorre a segunda seleção de espalhadores persistentes (PS) com um novo cálculo da Análise da Fase Atmosférica (APS), feita a partir de um valor menos restritivo para o índice da estabilidade de amplitude (ASI), sendo adotado assim o valor de 0,50. Sendo empregado nos pontos selecionados os mesmos parâmetros de tendência linear e altura, mesmo ponto de referência e mesma estimativa de ruído atmosférico utilizados na etapa anterior.

Durante essa etapa, o SARproZ executa um modelo para estimar a componente da fase atmosférica, com base nos seguintes princípios:

- Componentes temporais lentas: a deformação do terreno geralmente ocorre de forma contínua ao longo do tempo (ex.: subsidência), enquanto os efeitos atmosféricos são mais aleatórios.
- Correlação espacial: a atmosfera afeta áreas próximas de maneira semelhante, criando padrões espaciais contínuos.
- Separação por decomposição: o SARproZ utiliza técnicas como filtragem temporal e espacial (ex.: séries temporais e ajustes por mínimos quadrados) para separar a fase atmosférica da fase de deformação.

Com o resultado do novo APS há a remoção da fase atmosférica dos interferogramas diferencias com o objetivo de reduzir o atraso da fase atmosférica. Após a remoção do APS realiza-se a etapa final de processamento dos espalhadores persistentes (PS) para se obter a estimativa final de altitude e velocidade de deslocamento destes pontos. Souza (2022) destaca que cada PS é associado a um valor de velocidade linear anual (mm/ano) e a um deslocamento acumulado (mm) estimados para o período analisado, sendo considerado que o deslocamento acumulado é igual a velocidade vezes o tempo.

Finalmente o programa está apto para apresentar os resultados, logo são entregues os mapas de coerência, de deslocamentos acumulados e velocidade de deslocamento para o período de análise. Sendo esses mapas exportados para o formato *Google Earth* (.kml) após geocodificação.

Além dos mapas, o programa é capaz de exportar planilhas com os resultados numéricos dos deslocamentos acumulados, velocidade de deslocamentos, coerência, elevações e os deslocamentos medidos para toda a série temporal.

Com a série de dados obtidos pela planilha foram geradas seções transversais e longitudinais da área de estudo com o objetivo de se observar os deslocamentos do talude durante o período de análise. Estas seções foram então comparadas com a topografia original do terreno e com fotografias do local, para que se pudesse visualizar os deslocamentos na área de estudo e assim validar os resultados da pesquisa.

4 ÁREA DE ESTUDO

O capítulo descreve em detalhe a caracterização, o histórico e a análise geotécnica de da área de estudo. A escolha da região se deu em função do histórico conhecido de instabilidade do talude e da disponibilidade de dados técnicos relevantes, como sondagens, topografia e registros fotográficos. Uma retroanálise é apresentada indicando os mecanismos e o nível de instabilidade do maciço, confirmando a saturação como causa principal da movimentação da encosta.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho está localizada em uma faixa de dutos na Bahia nas proximidades da Base de Candeias e da Estação de Compressão São Francisco do Conde.

A Figura 64 apresenta a macrolocalização da área e uma imagem de satélite de abril de 2020.

A escolha do local se deu ao fato do conhecimento do histórico da instabilidade do talude e a disponibilidade de sondagens, topografia e fotos da área.



Figura 64 - Localização da área de estudo

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como pode ser observado, a área instável tem direção longitudinal aproximada SW-NE e, partindo da Faixa de Dutos, provavelmente se estende por mais de 100 m nesta direção. Os degraus que se observa no limite a montante da área são muros de arrimo em gabiões existentes.

4.2 HISTÓRICO DA INSTABILIDADE

Em junho de 2020 foi observada pela equipe local uma considerável movimentação do terreno junto a faixa de dutos, com direção do movimento perpendicular à faixa. Embora muito provavelmente tenha havido um incremento de deformação da massa instável na data referida acima, não foi possível definir a época, o tipo de movimento de massa em termos da sua velocidade.

Experiências anteriores na região mostram que as instabilidades de taludes naturais de pequena inclinação, são precedidas de processos de movimentação lenta da encosta (rastejo) tendo superfície de ruptura em camada superior do subsolo, constituída por material argiloso potencialmente expansivo resultante do intemperismo do maciço de folhelho subjacente, como é o caso da presente instabilidade. Esta característica tem duas implicações muito importantes para a análise da instabilidade. A primeira é que, como a instabilidade propriamente dita, entendida como o estado de equilíbrio limite, em que as forças resistentes são superadas pelas forças atuantes na superfície de deslizamento, é precedida de deslocamentos significativos da massa instável, geralmente é possível, ao identificar tais deslocamentos, atuar tempestivamente para evitar acidentes. A segunda implicação é que, em decorrência da primeira, o projeto de estabilização pode contemplar uma solução fortemente baseada no monitoramento do deslocamento do maciço como medida de segurança e confiabilidade.

Como a encosta em questão não é instrumentada e não há relatórios de inspeção informando, mesmo que de forma aproximada, a sua condição de estabilidade no período anterior ao incidente, não foi possível inferir o tipo de movimento ocorrido na massa instável. Contudo, como a direção do movimento é muito clara, aproximadamente perpendicular à faixa de dutos, conforme já citado, foi possível avaliar a progressão do movimento da massa instável ao longo dos meses e anos por meio de imagens de satélite e amultispectrais (Figura 65) as quais contemplam diversos dutos aéreos perfeitamente visíveis nestas imagens.



Figura 65 - Cronologia da Movimentação do Talude

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Após a constatação da instabilidade foi realizado pela operadora da faixa um levantamento topográfico planialtimétrico na área, o qual está reproduzido na Figura 66. Como pode ser observado, as curvas de nível apresentadas, mesmo que de forma aproximada, indicam uma maior movimentação da superfície no trecho de jusante, mas também há indício de movimentação, eventualmente localizada e pretérita, no meio da encosta.

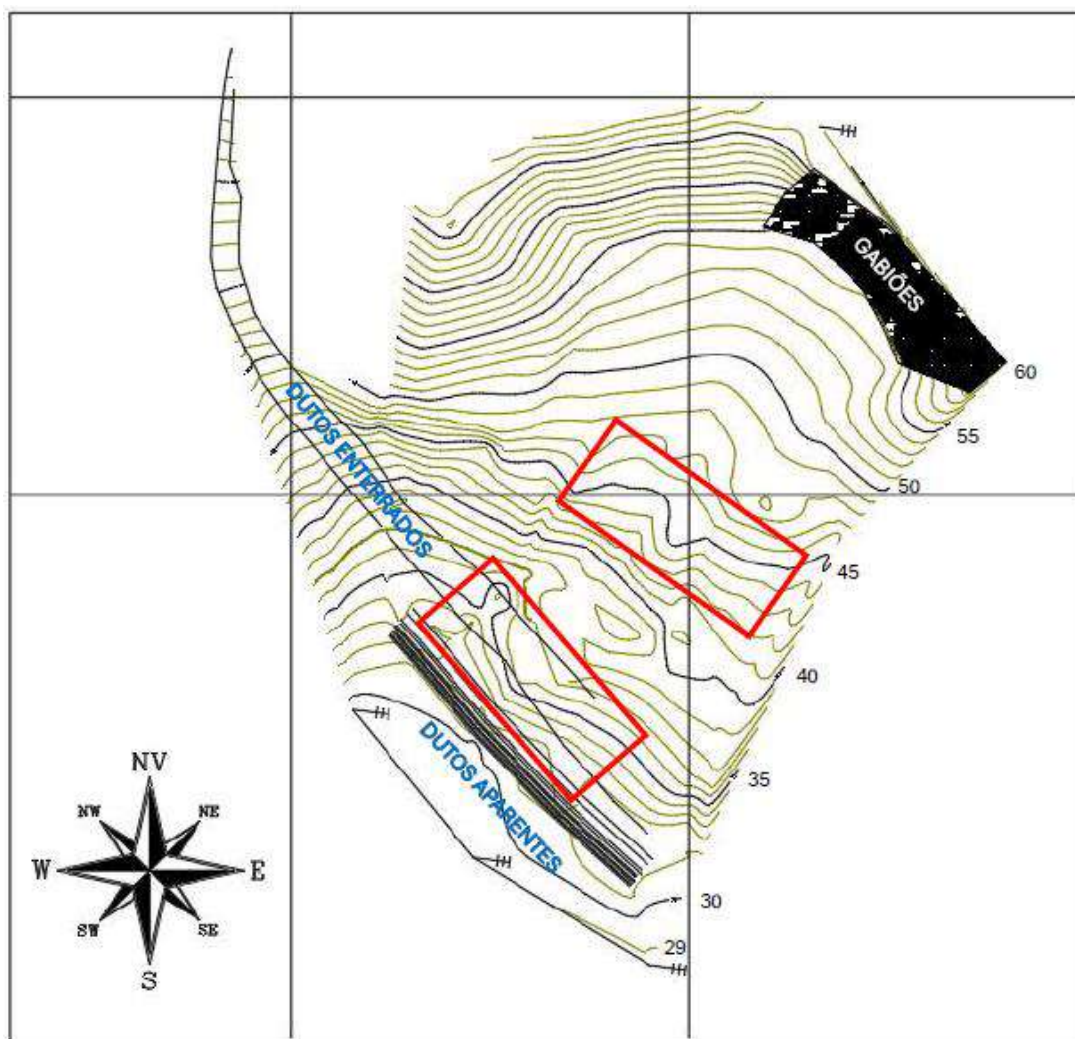


Figura 66 - Levantamento planialtimétrico realizado na área em junho de 2020 após a constatação da instabilidade. Indicação da movimentação em vermelho

Fonte: Adaptado de Transpetro (2020)

4.4 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

Após a constatação da instabilidade, foram realizadas pela operadora da faixa sondagens a percussão (SP-1 a SP-8) e mistas (SM-1 a SM-4). A localização aproximada dessas sondagens está apresentada na Figura 67. Como pode ser observado, as sondagens SP-1, SP-2, SM-2, SM-4, SP-3 e SP-7 estão alinhadas em um eixo coincidente com a direção do movimento constatado na encosta. Os relatórios de sondagem (Petrobras, 2020) foram então analisadas pelo autor e foi criada a seção aproximada (Figura 68), sendo que os perfis das referidas sondagens mostram que o subsolo local é constituído por uma camada superior de argila siltosa de consistência mole a média e espessura variando de 2 m na sondagem SP-1, a 7 m na sondagem SP-3, com predominância de um valor médio de cerca 5 m (SP-2, SM-2 e SM-4), seguida por uma camada de folhelho decomposto com espessura de 2 m a 3 m e consistência dura, por sua vez sobrejacente ao estrato rochoso sedimentar, folhelho pouco alterado. Algumas sondagens indicam que na seção apresentada na Figura 68, no período entre 08/07/2020 e 17/07/2020, o nível do lençol freático era aflorante.

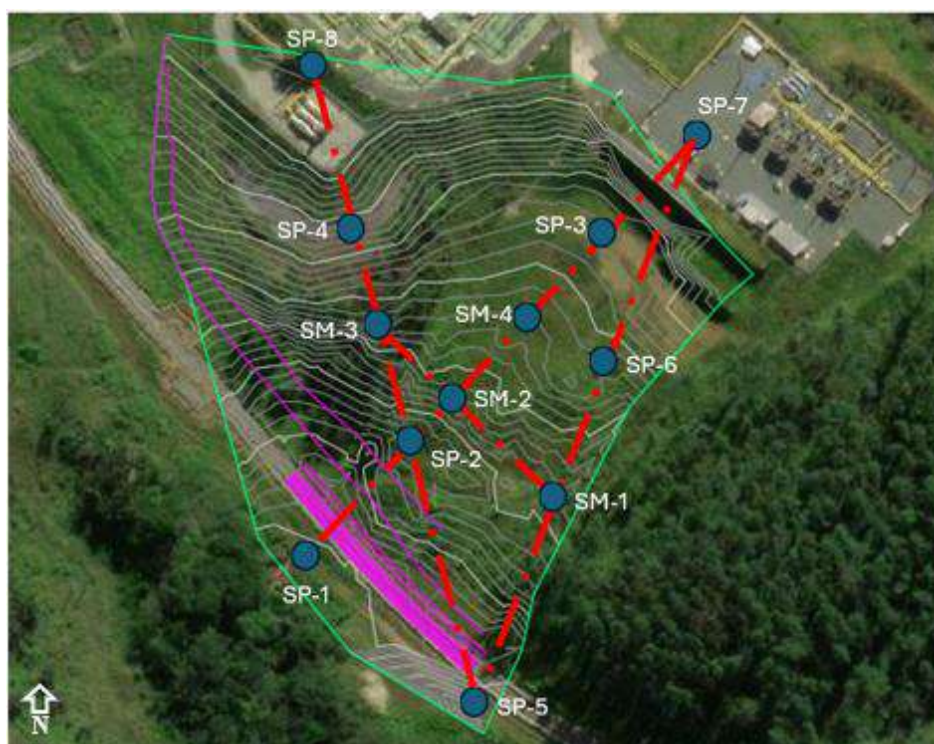


Figura 67 - Localização das sondagens a percussão e mistas realizadas na área

Fonte: Adaptado de Petrobras (2020)

O perfil geotécnico do terreno é apresentado na Figura 68. Destaca-se no perfil geotécnico um afloramento do nível d'água no talude, situação muito comum em casos de rastejo.

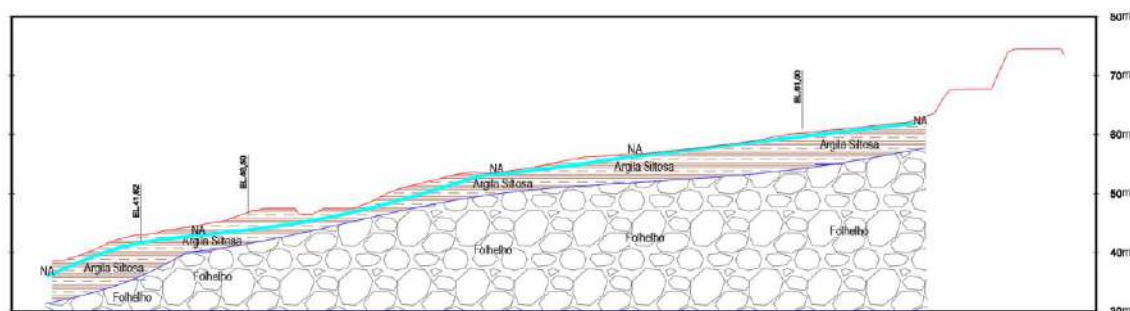


Figura 68 - Perfil geotécnico da área de estudo

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Com a interpretação das imagens e do perfil geotécnico do terreno, pôde-se confirmar as experiências anteriores na região em condições geotécnicas semelhantes, segundo as quais as instabilidades geotécnicas se manifestam com movimentos predominantemente lentos, resultando que o monitoramento de deslocamento, tende a ser uma medida eficaz do controle de segurança geotécnica da encosta.

4.5 RETROANÁLISE DA INSTABILIDADE

Conforme citado anteriormente, o processo de movimentação do talude é do tipo rastejo, movimento caracterizado por fluxos lentos de terra, imperceptíveis e contínuos (Highland e Bobrowsky, 2008). Não apresentam superfície de ruptura marcante, possuem taxas de deslocamento maiores na superfície do terreno que vão decrescendo com a profundidade e atuam sobre horizontes superficiais de solo, horizontes de contato entre solo e rocha e até mesmo em rocha (Augusto Filho, 1994).

Simões (1991) publicou um trabalho bem abrangente sobre os processos de instabilização de encostas na Bacia Sedimentar do Recôncavo Baiano. Geologicamente a Área de Interesse está localizada nesta Bacia (Figura 69), mais precisamente no Grupo Ilhas.

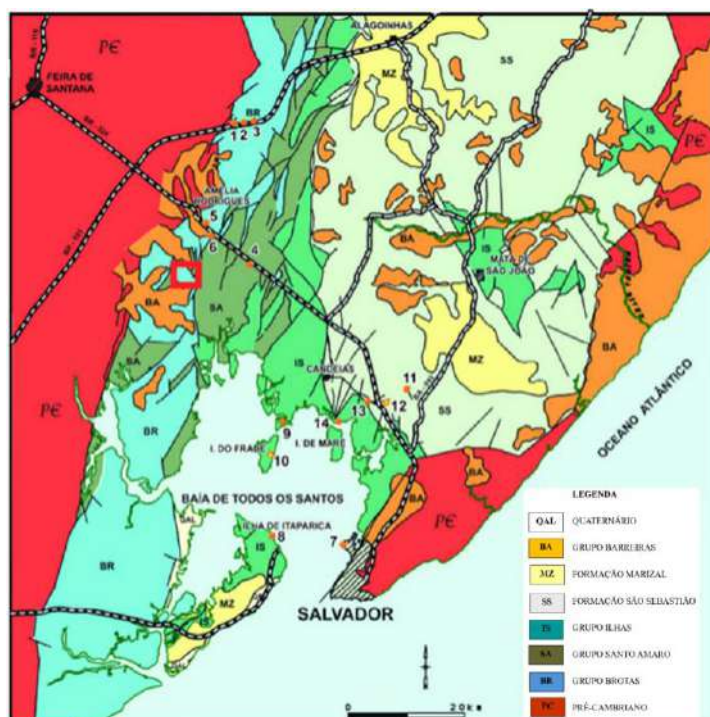


Figura 69 - Mapa do compartimento sul da Bacia do Recôncavo

Fonte: Adaptado de Lana (2022)

Simões (1991) relata que os deslizamentos de colúvios são observados com maior frequência nas encostas naturais destas formações. Os movimentos costumam ser predominantemente translacionais com uma pequena componente de rotação nos bordos da cunha. As rupturas se dão ao longo da superfície de contato entre os colúvios e os solos menos permeáveis subjacentes.

Os mantos de colúvio apresentam movimentos e alterações morfológicas progressivas ao longo do tempo, com taxas de deslocamento que se intensificam durante os períodos de maior pluviosidade. Tal comportamento decorre, principalmente, da atuação dos ciclos de expansão e contração dos materiais constituintes; da deposição sucessiva de sedimentos recentes; do aumento transitório das pressões intersticiais; e do acréscimo de carga nas camadas coluvionares em função da infiltração de água.

Segundo Simões (1991) em taludes mesmo sem a presença de colúvios, é possível observar movimentações lentas, em forma de rastejo, das camadas superficiais com umidades elevadas, característica que pode ser atribuída ao talude em estudo.

Simões (1991) relata ainda que estas movimentações lentas podem ser observadas em danos causados a vários locais da Bacia. Seccionamento de muros de gravidade,

levantamentos, ondulações e trincas em trechos de rodovias, além de fendas e ressaltos são alguns exemplos.

Com o objetivo de se avaliar o nível de estabilidade do maciço e tendo como base o conjunto de informações disponíveis principalmente o levantamento topográfico, a investigação geotécnica, o histórico de instabilidades da encosta e a vistoria realizada na área, foi possível inferir que a instabilidade em questão, com largura aproximada de 50 m e extensão longitudinal de cerca de 100 m, tem uma superfície de ruptura principal que coincide aproximadamente com a transição entre as camadas de argila siltosa mole a média e de folhelho decomposto, que ocorre em média aos 5 m de profundidade, bem como superfícies de ruptura secundárias, internas à essa massa instável, que envolve volumes menores de solo e provoca as irregularidades que se observa na superfície do terreno. Também é possível que a superfície de ruptura principal seja a soma das secundárias, as quais podem ter ocorrido de forma sucessiva.

Considerando os possíveis mecanismos de instabilidade descritos anteriormente e a análise da seção apresentada na Figura 68, foi elaborado por solicitação da operadora da faixa, uma modelagem para verificação da instabilidade em questão. As análises de estabilidade foram realizadas através do Método de Morgenstern-Price utilizando o programa computacional *GeoStudio* 2012. Foi utilizado o referido método por este admitir superfícies de ruptura “otimizadas”, além das circulares, o que tende a ser bem representativo da realidade no caso em questão. A Figura 70 apresenta a seção geotécnica aproximada utilizada na análise.

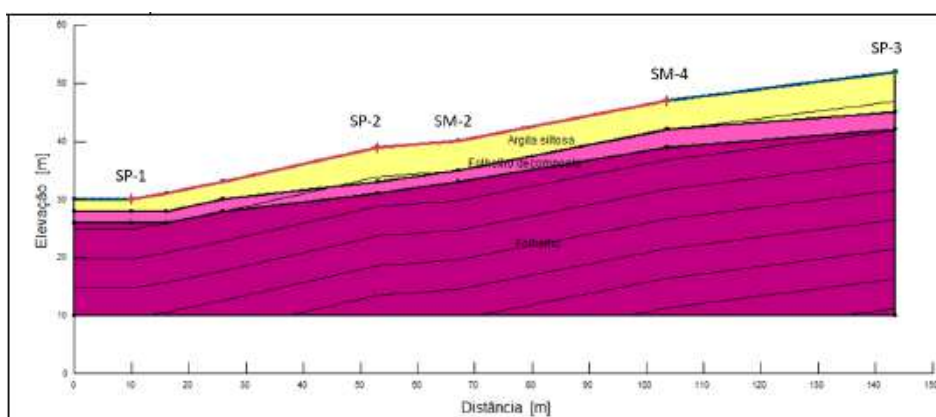


Figura 70 - Seção geotécnica aproximada no eixo coincidente com a direção da movimentação da massa instável

Fonte: Petrobras (2020)

Tendo em vista verificar a representatividade dos mecanismos de instabilidade e parâmetros de resistência inferidos, inicialmente a análise de estabilidade foi realizada considerando a configuração atual da seção de estudo, conforme apresentado na Figura 71. Como pode ser observado, o Fator de Segurança resultante foi 1,17, com uma superfície de ruptura relativamente limitada, sendo este fator uma razão entre a somatória das forças resistentes ao cisalhamento (valores característicos na ruptura, sem minoração) e as forças cisalhantes solicitantes (valores também característicos sem majoração). A partir deste resultado, antes de rever os parâmetros de resistência adotados, se conjecturou que o mais representativo seria analisar a seção considerando a sua provável configuração antes dos últimos movimentos, sem o abatimento que se observa aproximadamente no meio da seção, na progressiva 67 m do eixo das distâncias. Esta análise está apresentada na Figura 72 e, como pode ser observado, o Fator de Segurança resultante é 1,04 e a superfície de ruptura mais alongada, confirmando razoavelmente a análise realizada pelo método e os parâmetros de resistência adotados.

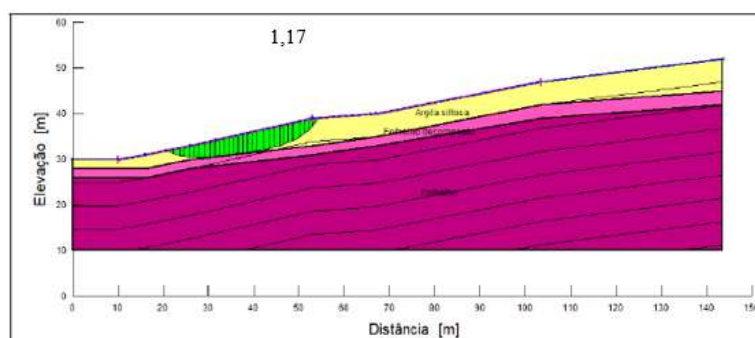


Figura 71 - Análise de estabilidade considerando a configuração atual da seção de estudo

Fonte: Petrobras (2020).

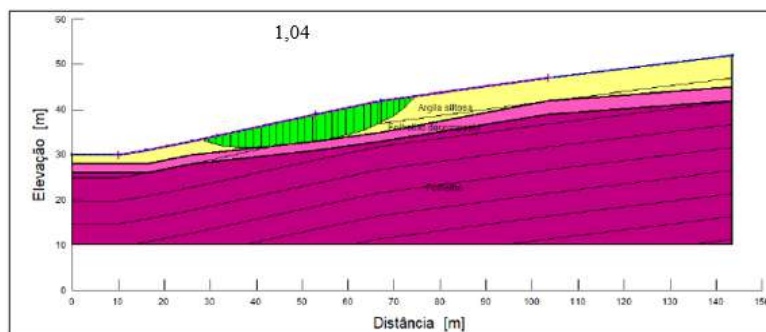


Figura 72 - Análise de estabilidade considerando a provável configuração da seção de estudo antes dos últimos movimentos da massa instável

Fonte: Petrobras (2020)

Considerando o tipo de solo, os parâmetros de resistência, a geometria da seção e o histórico da encosta, pôde-se inferir pela análise que a causa principal da instabilidade é a saturação da camada de argila siltosa mole a média. Para confirmar tal hipótese, foi realizada uma análise de estabilidade da seção de estudo considerando a mesma configuração apresentada na Figura 70, porém com o nível d'água rebaixado, ficando a 3m de profundidade a partir da superfície do terreno, ao longo de toda a encosta, conforme apresentado na Figura 73. Como pode ser observado, o Fator de Segurança sobe para 1,58, mostrando que a saturação da camada superior é o fator de instabilidade da encosta.

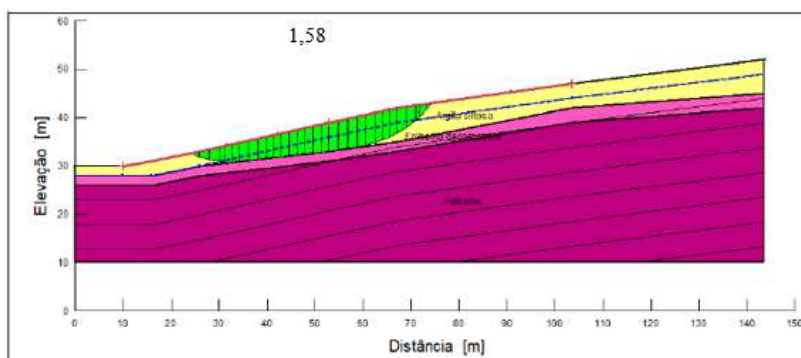


Figura 73 - Análise da estabilidade da seção de estudo com o nível d'água rebaixado 3m

Fonte: Petrobras (2020)

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O capítulo expõe os resultados da aplicação da técnica DInSAR no talude em processo de rastejo. Foram adotadas duas abordagens utilizando-se imagens SAR do satélite Sentinel-1. Para cada abordagem são apresentadas as etapas de análise e as respectivas observações para os resultados de coerência interferométrica e das medidas dos deslocamentos.

5.1 TÉCNICA DINSAR CLÁSSICA

A primeira parte do estudo foi a adoção da técnica DInSAR clássica visando confirmar a sua aplicabilidade à medição de deslocamentos. A análise desta técnica foi baseada na medição da coerência interferométrica com o objetivo inicial de verificar a qualidade dos interferogramas.

Como apresentado no capítulo anterior, foram selecionadas 14 imagens SAR para processamento no programa SNAP.

5.1.1 GERAÇÃO DOS PARES INTERFEROMÉTRICOS

Após processamento dos pares interferométricos selecionados foi verificado os valores para as linhas de base perpendicular e temporal de cada par interferométrico para garantir que estes valores na série temporal não excedessem valores críticos.

Para os 12 pares processados a menor linha temporal foi de 12 dias e a maior de 192 dias. O menor valor de linha de base perpendicular encontrado foi de 4,33 m e o máximo 172,17 m.

A Tabela 2 apresenta os valores de linha de base perpendicular e temporal dos 12 pares processados.

Tabela 2 - Composição de pares interferométricos e linhas de base perpendicular e temporal

Produto (par interferométrico)	Linha de base perpendicular (m)	Linha de base temporal (dias)
20190611_20190623	62.20	-12
20190611_20190717	83,58	-36
20190611_20190822	172,17	-72
20190611_20190927	147,69	-108
20190611_20191021	77,61	-132
20190611_20191126	60.00	-168
20190611_20191220	88.65	-192
20200113_20200218	-34.16	-36
20200113_20200313	33.22	-60
20200113_20200430	4.33	-108
20200113_20200524	-18.29	-132
20200113_20200617	-26.61	-156.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Crosetto *et al.* (2005) observam que para cada sistema SAR, existe uma linha de base perpendicular crítica que corresponde a uma decorrelação completa da fase interferométrica. No caso da aplicação da técnica DInSAR para medição de deformações do solo, as linhas de base devem ser as menores possíveis, sendo que quando estas medidas se aproximam de zero, a sensibilidade à topografia do terreno seria nula, minimizando mudanças nas feições do terreno imageado.

Fárová *et al.* (2019) destacam que um valor crítico da linha de base perpendicular para produtos Sentinel seria de 200m, e que uma linha de base maior que este valor crítico poderia causar uma decorrelação geométrica e, neste caso, a fase interferométrica não seria utilizável. Para os pares interferométricos analisados neste estudo a linha de base perpendicular ficou dentro dos limites críticos.

5.1.2 ESTIMATIVA DE COERÊNCIA

Foram selecionados uma série de pontos localizados no talude em análise e em suas imediações, indicados na Figura 74, como referências para a avaliação da coerência dos pares interferométricos. O objetivo de ampliar a área de análise foi promover um comparativo entre coerências no talude propriamente dito e em área contíguas.



Figura 74 - Pontos para avaliação da coerência interferométrica, com indicação da área em rastejo (retângulo tracejado)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os resultados da estimativa de coerência gerados pelo processamento para cada par interferométrico estão apresentados nas Tabelas 3 e 4. Para o processamento dos pares interferométricos foi adotado um *pixel* de 10 x 10 m e como os pontos estão espaçados em cerca de 30 m, pode-se considerar o resultado de coerência de cada *pixel* para cada ponto selecionado.

Os mapas de coerência gerados pelo processamento para cada par interferométrico de 2019 e 2020 envolvendo a área de estudo e adjacências estão apresentados na Figura 75, com valores em escala de cinza.

Tabela 3 - Estimativa de coerência para os pares interferométricos de 2019. Em cor verde coerências acima de 0,50

Ponto	Pares interferométricos 2019						
	20190611 20190623	20190611 20190717	20190611 20190822	20190611 20190927	20190611 20191021	20190611 20191126	20190611 20191220
1	0.85	0.71	0.82	0.66	0.60	0.55	0.50
2	0.68	0.84	0.64	0.66	0.65	0.64	0.79
3	0.28	0.52	0.21	0.31	0.26	0.45	0.59
4	0.31	0.18	0.06	0.23	0.14	0.21	0.22
5	0.26	0.15	0.08	0.19	0.10	0.23	0.17
6	0.19	0.17	0.16	0.13	0.12	0.12	0.18
7	0.11	0.14	0.23	0.08	0.12	0.08	0.17
8	0.82	0.61	0.80	0.70	0.60	0.60	0.52
9	0.81	0.79	0.79	0.75	0.71	0.54	0.69
10	0.52	0.74	0.51	0.58	0.59	0.53	0.74
11	0.24	0.44	0.19	0.32	0.34	0.25	0.47
12	0.19	0.15	0.08	0.17	0.17	0.15	0.22
13	0.18	0.12	0.07	0.14	0.10	0.24	0.07
14	0.12	0.13	0.14	0.14	0.13	0.15	0.08
15	0.73	0.33	0.67	0.61	0.48	0.38	0.29
16	0.70	0.54	0.66	0.65	0.54	0.33	0.44
17	0.55	0.65	0.54	0.62	0.58	0.26	0.60
18	0.27	0.52	0.25	0.38	0.36	0.17	0.45
19	0.11	0.32	0.13	0.20	0.16	0.10	0.19
20	0.18	0.11	0.15	0.07	0.08	0.11	0.07
21	0.11	0.13	0.14	0.15	0.10	0.17	0.08
22	0.33	0.33	0.22	0.24	0.24	0.06	0.17
23	0.13	0.26	0.18	0.12	0.12	0.11	0.20
24	0.12	0.17	0.18	0.11	0.07	0.11	0.10
25	0.11	0.10	0.15	0.15	0.13	0.09	0.10
26	0.14	0.20	0.12	0.16	0.15	0.15	0.19
27	0.10	0.22	0.14	0.13	0.10	0.19	0.21
28	0.11	0.10	0.18	0.12	0.06	0.10	0.19
29	0.12	0.13	0.18	0.18	0.14	0.17	0.14
30	0.15	0.16	0.12	0.13	0.17	0.16	0.24
31	0.20	0.23	0.17	0.11	0.17	0.08	0.20
32	0.19	0.21	0.24	0.11	0.09	0.20	0.17
33	0.19	0.13	0.13	0.09	0.17	0.12	0.23
34	0.28	0.09	0.22	0.07	0.16	0.07	0.23

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 4 - Estimativa de coerência para os pares interferométricos de 2020. Em destaque
coerências acima de 0,50

Ponto	Pares interferométricos 2020				
	20200113 20200218	20200113 20200313	20200111 20200430	20200113 20200524	20200113 20200617
1	0.76	0.81	0.68	0.80	0.83
2	0.68	0.86	0.64	0.65	0.73
3	0.28	0.63	0.23	0.23	0.28
4	0.24	0.27	0.15	0.14	0.20
5	0.27	0.25	0.22	0.15	0.19
6	0.27	0.21	0.24	0.24	0.20
7	0.23	0.12	0.15	0.24	0.21
8	0.67	0.52	0.58	0.65	0.74
9	0.72	0.78	0.67	0.71	0.75
10	0.57	0.79	0.52	0.42	0.53
11	0.27	0.55	0.23	0.15	0.25
12	0.16	0.28	0.10	0.12	0.21
13	0.13	0.16	0.09	0.10	0.18
14	0.09	0.16	0.09	0.12	0.15
15	0.63	0.30	0.54	0.59	0.67
16	0.62	0.54	0.55	0.59	0.65
17	0.49	0.61	0.44	0.43	0.48
18	0.28	0.47	0.24	0.21	0.26
19	0.11	0.21	0.15	0.10	0.12
20	0.09	0.06	0.15	0.10	0.10
21	0.12	0.08	0.08	0.06	0.09
22	0.28	0.18	0.14	0.16	0.18
23	0.25	0.07	0.15	0.15	0.11
24	0.17	0.06	0.14	0.15	0.10
25	0.16	0.07	0.14	0.11	0.15
26	0.23	0.08	0.20	0.16	0.10
27	0.25	0.12	0.16	0.16	0.11
28	0.14	0.07	0.13	0.10	0.12
29	0.20	0.10	0.31	0.14	0.15
30	0.17	0.17	0.26	0.07	0.16
31	0.12	0.13	0.17	0.14	0.11
32	0.21	0.10	0.26	0.11	0.17
33	0.14	0.11	0.30	0.08	0.12
34	0.16	0.16	0.21	0.17	0.10

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

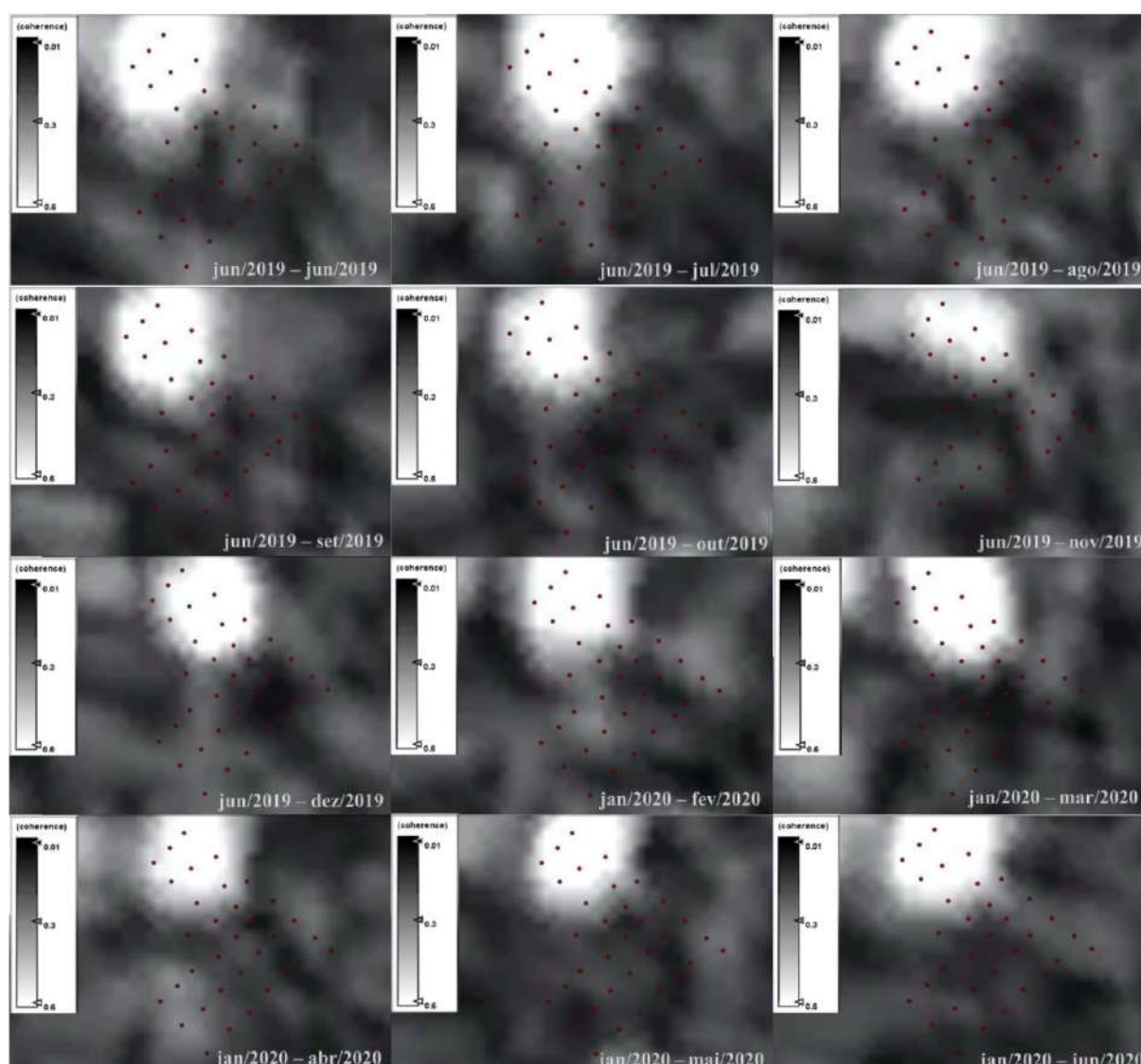


Figura 75 - Resultado matricial da coerência no período de Jun/2019 a Jun/2020

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Observa-se que a principal região que é o foco deste estudo, ou seja, o talude em rastejo (Figura 74), não apresenta, de uma maneira geral, boa coerência. Tal resultado pode ser devido a presença de vegetação e à umidade junto a superfície do solo, posto que se observou surgência de água na metade superior do talude, conforme apresentado no perfil geotécnico da área de estudo apresentado anteriormente (Figura 68). O nível d'água elevado pode ter deixado a massa de solo com teor de umidade suficiente para diminuir o nível de correlação dos sinais entre as duas imagens SAR. Por outro lado, os locais sem a presença de

vegetação e com um certo grau de urbanização (cobertura em concreto) apresentou alta coerência indicando qualidades dos interferograma de boa a excelente.

Vários autores têm analisado a viabilidade da interferometria diferencial clássica (DInSAR) em função da coerência. Atanasova *et al.* (2021) indicam que a coerência é considerada confiável somente se seu valor estiver acima de 0,3. Os baixos valores deste parâmetro podem se dever a diversos fatores externos: o estado da troposfera durante o momento da aquisição na área de estudo, a posição do satélite, a presença de vegetação, entre outros. Fárová *et al.* (2019) citam que a técnica DInSAR clássica só funciona corretamente em áreas onde os interferogramas gerados são caracterizados por alta coerência, pois um valor de coerência insuficiente dos *pixels* correspondentes causa valores de diferença de fase não confiáveis. Entre as superfícies típicas com baixa coerência estão as florestas e outras áreas com vegetação densa. Além disso, mudanças na umidade próxima à superfície também podem causar perdas de coerência. Maccardle *et al.* (2005) citam Singhroy (2002) que menciona a falta de coerência como principal fator que limita o monitoramento interferométrico, particularmente em regiões úmidas com muita vegetação. Em áreas de baixa coerência, a interpretação contínua da fase interferométrica pode se tornar impossível. Glaser *et al.* (2002), Kajuna *et al.* (2011), Walter *et al.* (2011), citam a problemática da baixa coerência por afetarem a confiabilidade dos dados de deslocamento obtidos pelas técnicas DInSAR clássicas, principalmente, em área afetadas por mudanças sazonais, vegetação densa ou processos de deformação complexos. Eles propõem o uso de outras técnicas para otimizar a coerência de forma a melhorar a qualidade dos resultados.

Com os baixos resultados de coerência obtidos nesta primeira abordagem, será apresentado a seguir uma segunda abordagem. Será aplicada a técnica PSI proposta por Perissin *et al.* (2011) com o objetivo de maximizar a coerência interferométrica e assim obter medidas de deslocamento confiáveis.

5.2 TÉCNICA DOS ESPALHADORES PERSISTENTES (*PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY*, PSI)

5.2.1 PREPARAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

Os procedimentos para preparação dos dados de entrada descritos no Capítulo 3 foram efetivados para a pilha de 20 imagens e de acordo com a configuração em estrela com imagem mestre de 20/12/2019 (Figura 76).

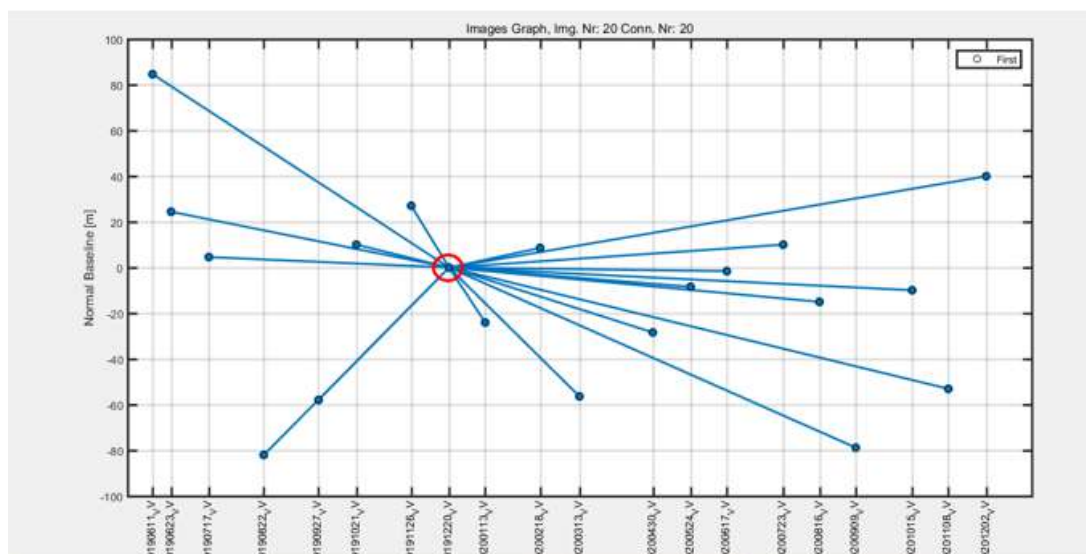


Figura 76 - Gráfico das linhas de base temporal e espacial para a pilha de imagens. Marcada em vermelho a imagem mestre selecionada

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Após a análise das 20 imagens SLC, foram calculadas as linhas de base perpendicular máxima e a linha de base temporal máxima, resultando em cerca de 80 m para a linha de base perpendicular e 348 dias para a linha de base temporal, enquanto a linha de base perpendicular mínima foi de cerca de 20 m e a linha de base temporal mínima foi de 24 dias.

Para realizar o coregistro da imagem mestre e das imagens escravas desta configuração, foi selecionada uma área com raio de 5 km (Figura 77) a partir de um ponto localizado no centro do talude em estudo.

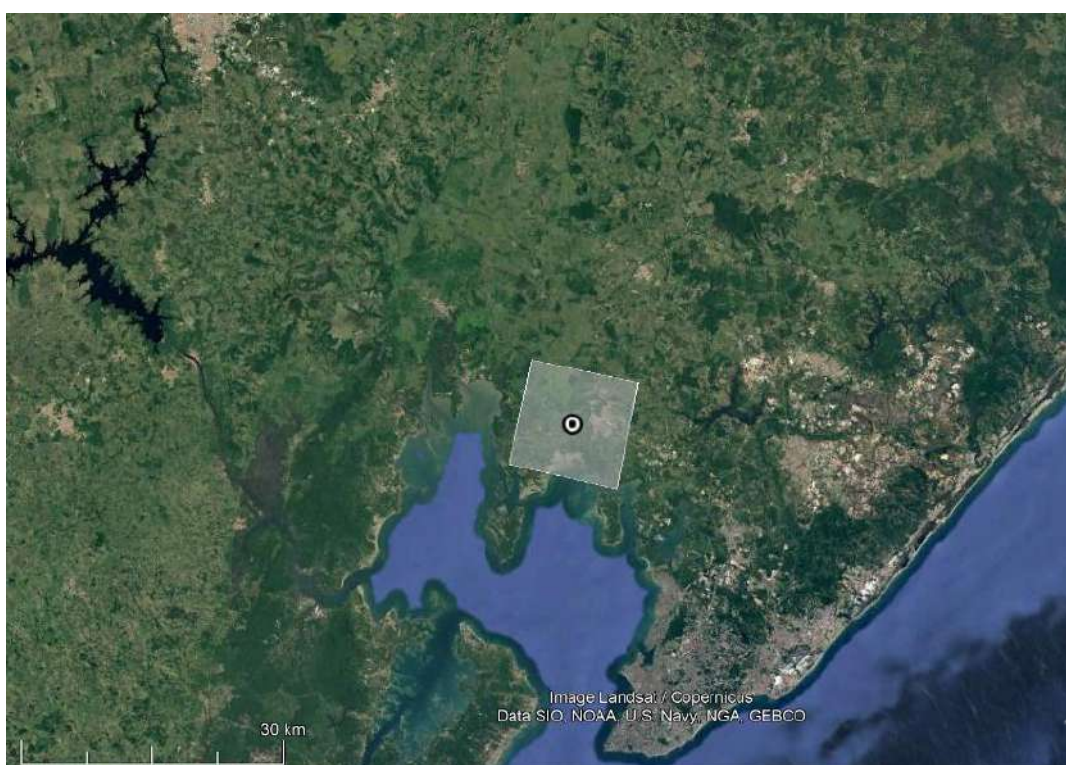


Figura 77 - Área selecionada para processamento. Ao centro localização do talude em estudo

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A figura 78 apresenta os resultados da etapa de coregistro para as imagens master e um exemplo de imagem escrava.

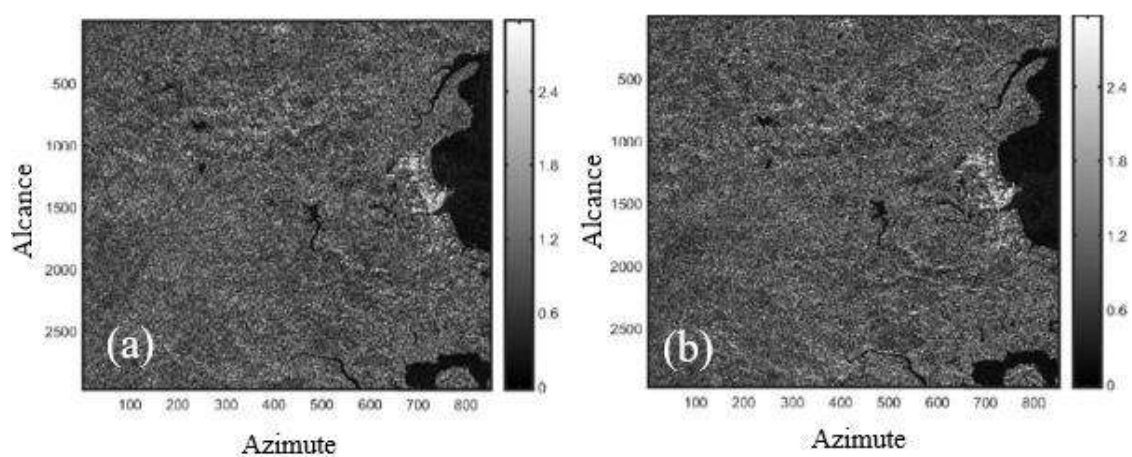


Figura 78 - Imagens coregistradas (a) imagem mestre, (b) exemplo de imagem escrava

A escala representa a intensidade da imagem SAR

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.2.2 ESTIMATIVA DA FASE DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

Para o processamento do Índice de Estabilidade de Amplitude (ASI) foi utilizado o valor de 0,60 em função da área em estudo não ser urbanizada.

Nesta etapa também foi definido um limite de coerência mínima a ser considerado no processamento. Foi usado como referência os valores preconizados pelo *Canada Center for Remote Sensing* CCRS (1999), que considera valores acima de 0,5 de coerência para interferogramas de boa qualidade. Estes limites de coerência foram apresentados no Quadro 7 do Capítulo 2.

Após a utilização do ASI foram selecionados os primeiros candidatos a espalhadores persistentes (PSC) e determinou-se um ponto de referência estável, com valor de coerência temporal igual a 1,0 (Figura 79).

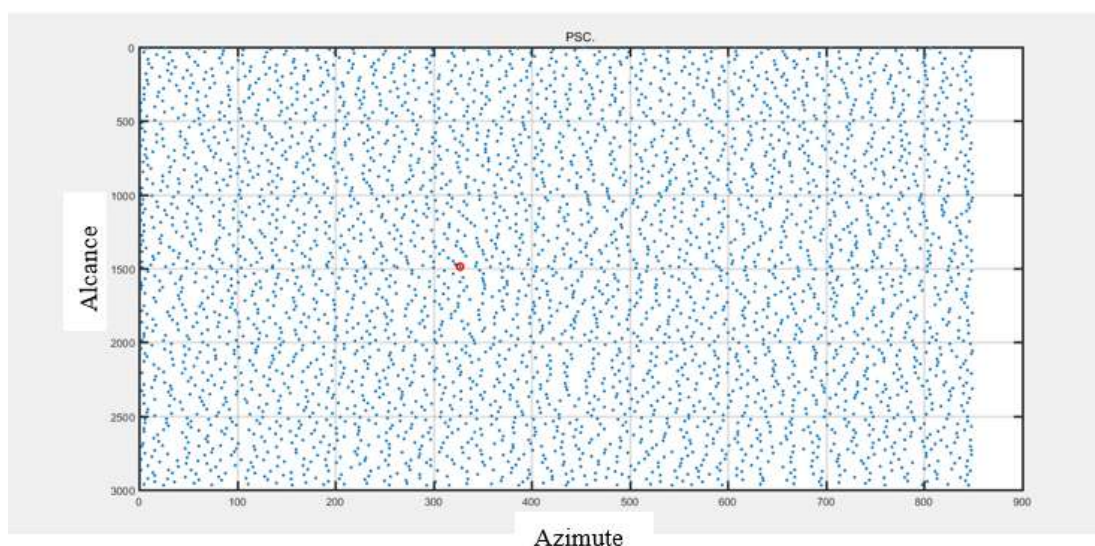


Figura 79 - Primeiros candidatos a espalhadores persistentes selecionados para a área de processamento com indicação do ponto de referência em vermelho

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Foram selecionados 4.054 PSC em cerca de aproximadamente 100 km² de área de processamento. Devido ao caráter não urbanizado da área, este resultado pode ser considerado de baixa concentração de PSC (40,54 PSC/km²). Áreas urbanizadas podem gerar cerca de 2.000 PSC/km² (Perissin *et al.*, 2011).

Segue-se para a segunda seleção dos espalhadores persistentes (PS) considerando um novo cálculo da Análise da Fase Atmosférica (APS) e a etapa do processamento multi-temporal destes pontos persistentes que obteve um conjunto mais denso de pontos PS, com cerca de 980 PS/km².

Adicionalmente o SARproZ oferece um módulo de processamento para áreas de interesse mais específicas, com o objetivo de analisá-las em profundidade e para testar diferentes técnicas. Este módulo foi utilizado no processamento das imagens, sendo necessário realizar as etapas de pré-processamento, já citadas anteriormente.

Os resultados foram então georreferenciados e exportados, gerando arquivos para serem utilizados no *Google Earth* (.kml) ou *Microsoft Excel* (.xlsx).

5.2.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE COERÊNCIA

Após a última etapa de processamento foi gerado o mapa de coerência (Figura 80)

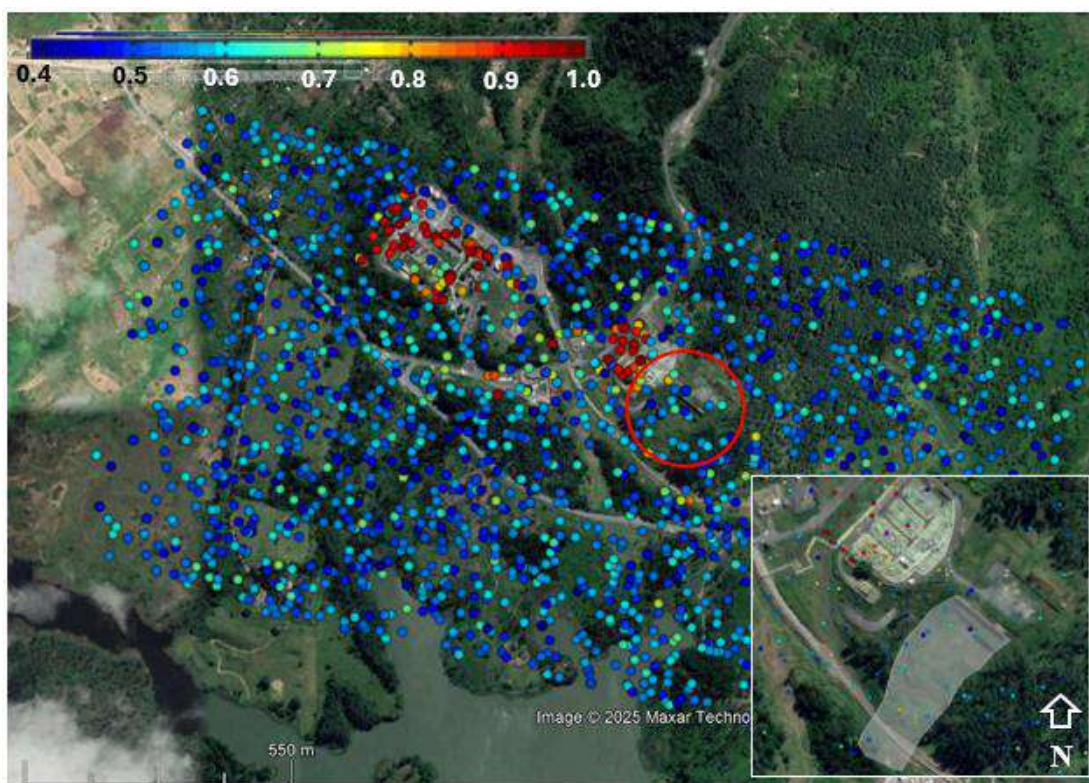


Figura 80 - Mapa com a medida de coerência para a área de estudo. Área de Interesse em destaque

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Pode ser verificado no mapa a influência da vegetação como um fator importante na determinação do índice de coerência. Como a região de estudo está localizada em área pouco urbanizada, a quantidade superior de pontos PS com baixa coerência (abaixo de 0,50) é considerável.

Importante observar os pontos PS com alta coerência (acima de 0,80) nos locais onde há estruturas construídas (arruamento, edificações, equipamentos) mostrando que este tipo de superfície favorece o aumento da coerência interferométrica.

Com o objetivo de se observar a efetividade da técnica PSI para aprimorar as medidas de coerência, foi feito um comparativo entre os valores obtidos com a técnica DInSAR clássica para alguns pares de imagens e os valores obtidos com a técnica PSI. Foram selecionados pontos PS no interior do polígono (Figura 81a) formado pelos pontos utilizados na análise DInSAR clássica (Figura 74). A seguir foi elaborado um gráfico com os valores de coerência para melhor visualização (Figura 81b).

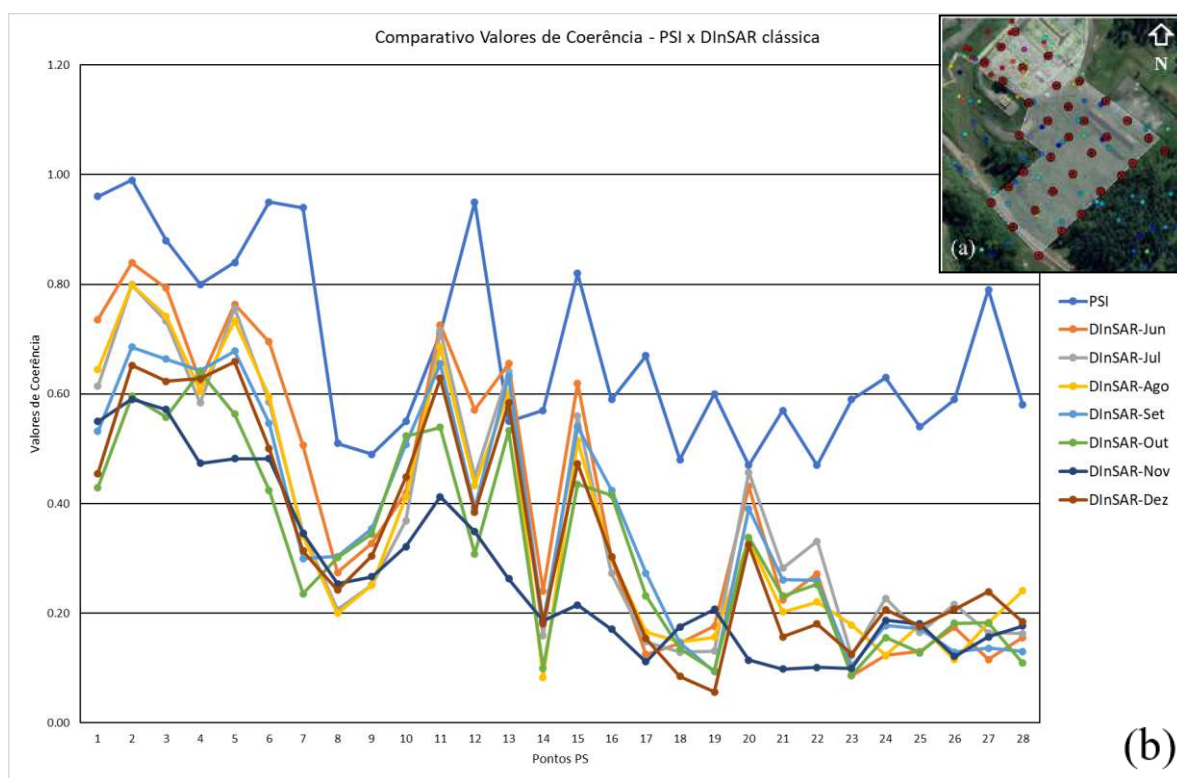


Figura 81 - (a) Região onde foram selecionados os pontos PS para análise da coerência. (b) Gráfico comparativo das medidas de coerência obtidas pela técnica PSI e pela técnica DInSAR clássica

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como pode ser constatado na Figura 81, os valores de coerência obtidos pela técnica PSI apresentaram uma diferença significativa com relação à técnica DInSAR clássica. Esta diferença era esperada em função da metodologia utilizada na técnica PSI maximizar a seleção de *pixels* com valores de coerência maiores.

Um outro ponto abordado foi a análise da quantidade total de pontos PS. Pôde-se verificar que para a área analisada cerca de 95% dos pontos PS tiveram coerência abaixo de 0,80 (Figura 82), mostrando a característica predominantemente não urbanizada da região.

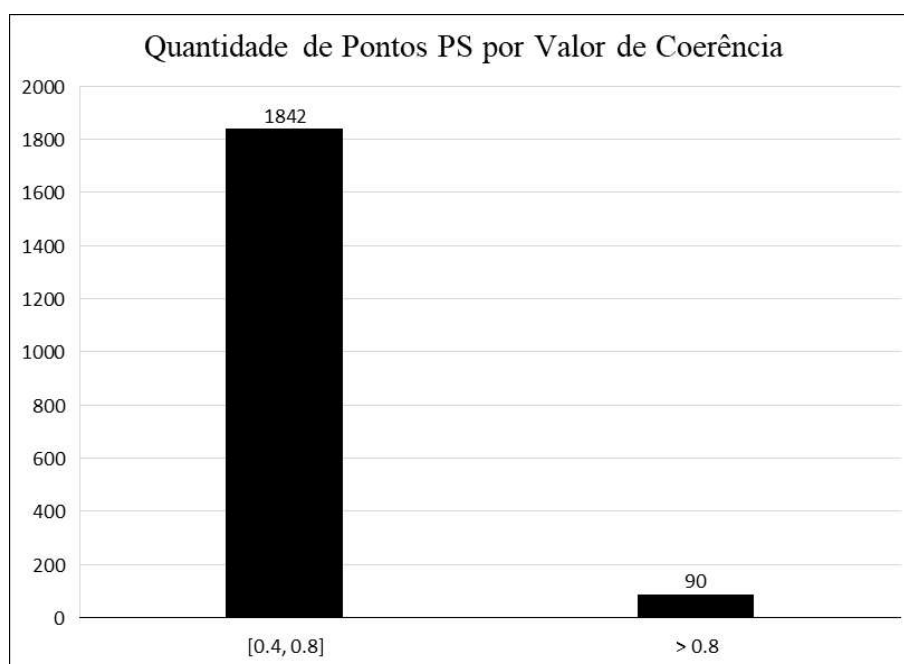


Figura 82 - Quantidade de pontos PS por valor de coerência

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.2.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

Os resultados para os deslocamentos acumulados no período e para a velocidade de deslocamento foram então gerados pelo programa e estão apresentados nas figuras 83 e 84, respectivamente.

Nestes mapas cada ponto representa um PS que possui informações de coordenadas, elevação, velocidade média em mm/ano, deslocamento acumulado em mm, na direção da linha de visada (*Line-of-Sight* – LOS) do satélite. As cores representam uma escala da magnitude da deformação da superfície, velocidade (mm/ano) e deslocamento (mm), sendo

considerados como valores negativos velocidades/deslocamentos na direção da linha de visada, no sentido satélite superfície, representando uma tendência a racalque, e valores positivos, a velocidades/deslocamentos na direção contrária a linha de visada, representando uma tendência a soerguimento.

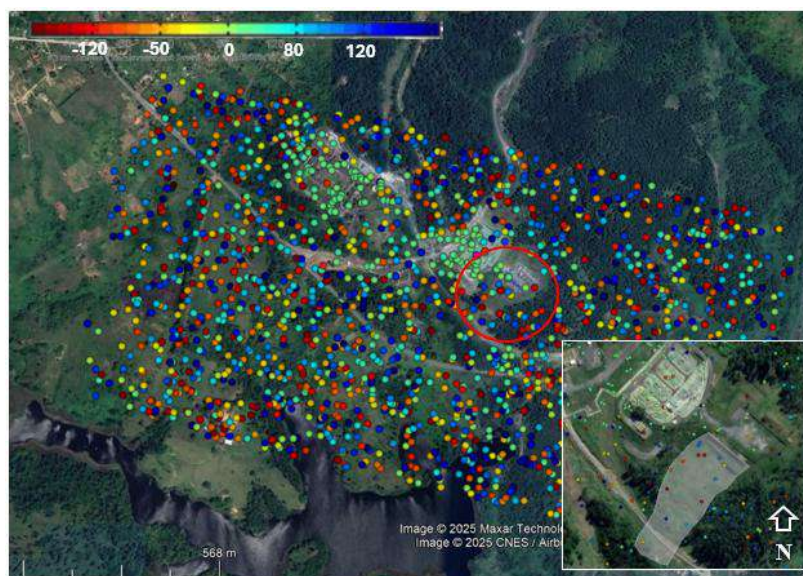


Figura 83 - Mapa de deslocamentos em mm. Talude de estudo em destaque

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

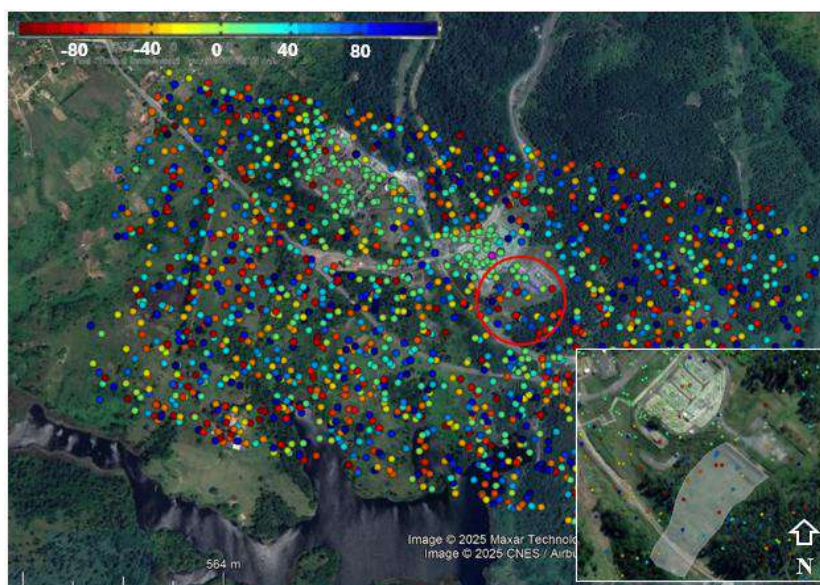


Figura 84 - Mapa de velocidade de deslocamento em mm/ano. Talude de estudo em destaque

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como esperado, não foi encontrada uma grande quantidade de pontos PS na Área de Interesse, mas esta restrição não prejudicou a análise da técnica para avaliar os deslocamentos no talude, como será visto a seguir.

Os resultados apresentam uma variação nas direções de deslocamento, podendo ser observados, em partes distintas do talude, pontos PS nas cores vermelho/laranja, indicando deslocamentos negativos (recalques), e pontos PS em tons de azul, indicando deslocamentos positivos (soerguimento).

Estes resultados podem ser vistos mais em detalhe na Figura 85.

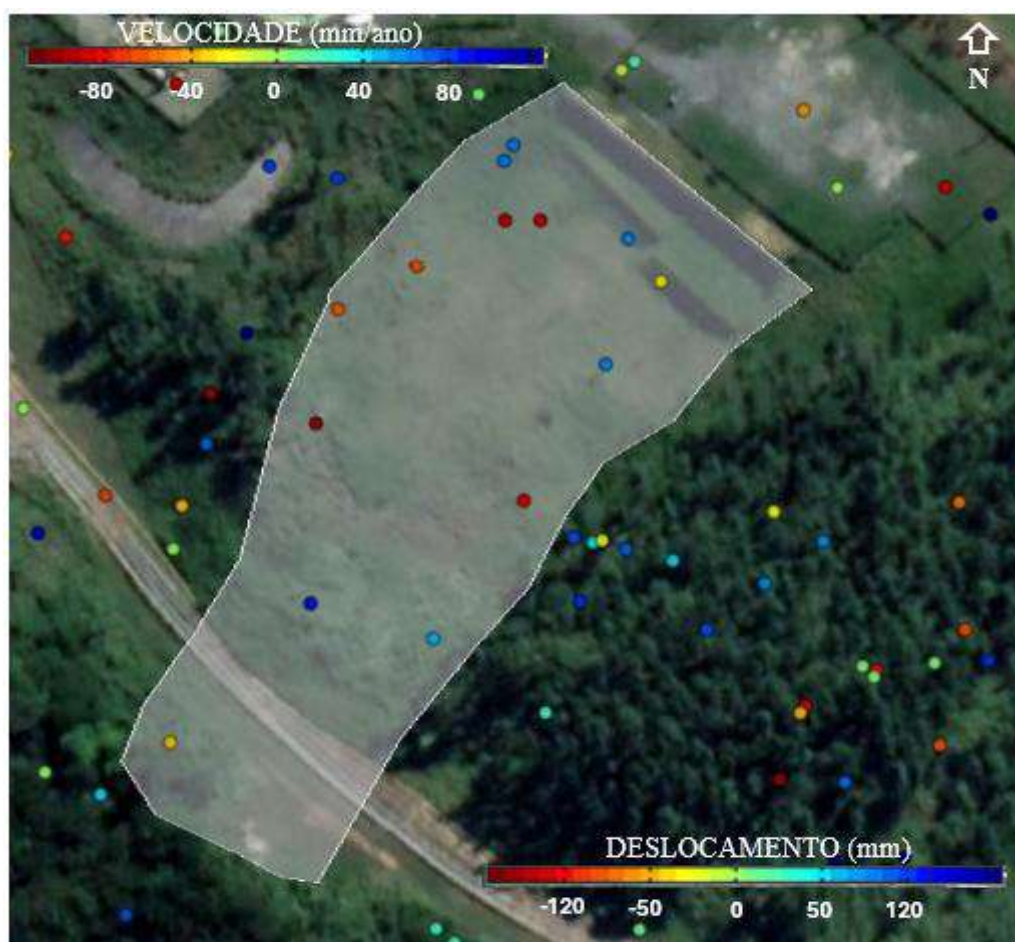


Figura 85 - Medidas de deslocamento e velocidade da Área de Interesse

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Considerando os pontos PS utilizados na análise, o talude estudado teve deslocamentos acumulados médios de -28 mm (recalque) e velocidade média dos deslocamentos de -19 mm/ano (recalque). Já os valores máximos calculados de deslocamentos foram de -147 mm e 104 mm, e velocidade -99 mm/ano e 70 mm/ano.

As medições também foram avaliadas em três locais distintos (crista, meio e base) do talude (Figura 86), os resultados estão apresentados na Tabela 5.



Figura 86 - Localização dos pontos no talude

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 5 - Medidas aproximadas de deslocamento e velocidade para locais do talude

Local	Deslocamento LoS (mm)			Velocidade LoS (mm/ano)		
	Média	Máximo Recalque	Máximo Soerguimento	Média	Máximo Recalque	Máximo Soerguimento
Crista	-17	-130	71	-12	-88	48
Meio	-79	-147	64	-53	-99	43
Base	35	-54	104	23	-36	70

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As magnitudes do deslocamento e sua velocidade indicam que a movimentação do maciço realmente é do tipo muito lento (rastejo) e estão dentro da ordem de grandeza de mm/ano, conforme apresentado por WP/WLI (1995) no Quadro 3 do Capítulo 2.

A análise qualitativa dos resultados foi feita de duas maneiras. Inicialmente com os resultados de deslocamento acumulados e suas respectivas coordenadas, foi gerada uma superfície de deslocamento. Esta superfície foi modelada por meio de interpolação TIN (*Triangulated Irregular Network*), que é um método de interpolação que conecta os pontos

utilizando triângulos não sobrepostos, criando, assim, uma superfície de terreno em três dimensões. Uma das vantagens deste tipo de interpolação é que ela representa bem o relevo com poucos pontos.

Foi considerado o início da superfície a partir de cerca de 10 m da aresta do muro gabião superior. Assumindo-se que esta parte do talude pode ser considerada sem deslocamentos, pois em vistoria realizada na área foi constatada a presença de trincas em estruturas de drenagem (escada hidráulica) nesta direção, indicando o início do movimento do talude neste ponto.

Um outro ponto considerado foram as elevações de cada ponto PS utilizadas na modelagem da superfície de deslocamento. Estas elevações foram definidas tomando as elevações do levantamento topográfico como referência, ou seja, as elevações da superfície de deslocamento foram calculadas pegando-se a elevação do levantamento topográfico na coordenada de cada ponto PS e subtraindo-se o deslocamento acumulado neste mesmo ponto PS.

Com o objetivo de avaliar as medidas de deslocamento feitas pela técnica PSI, após a construção da superfície de deslocamento foi feito um comparativo com a superfície gerada pelo levantamento topográfico existente para a Área de Interesse. A Figura 87 apresenta as superfícies geradas através dos deslocamentos acumulados dos pontos PS e do levantamento topográfico existente.

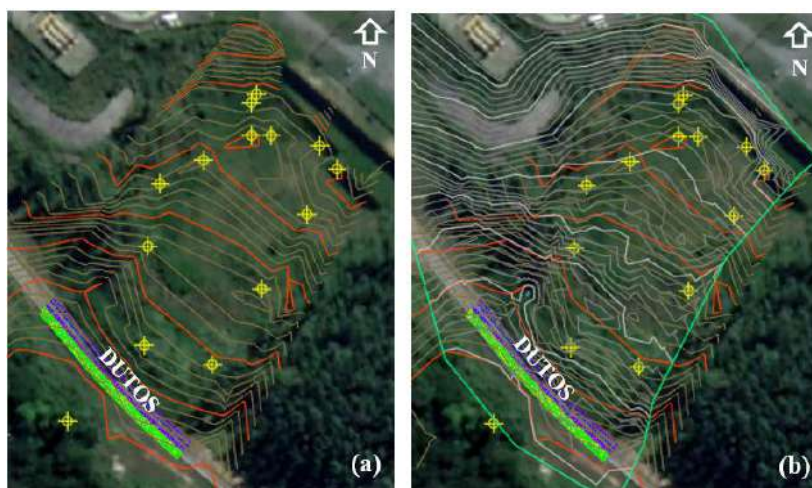


Figura 87 - (a) Superfície formada pelos deslocamentos acumulados; (b) Superfície formada pelo levantamento topográfico sobreposto

Em amarelo os pontos PS considerados na modelagem.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Após a construção das superfícies foram gerados perfis longitudinais e transversais com o objetivo de analisar as movimentações do talude. A Figura 88 apresenta a localização em planta das seções transversais e longitudinais.

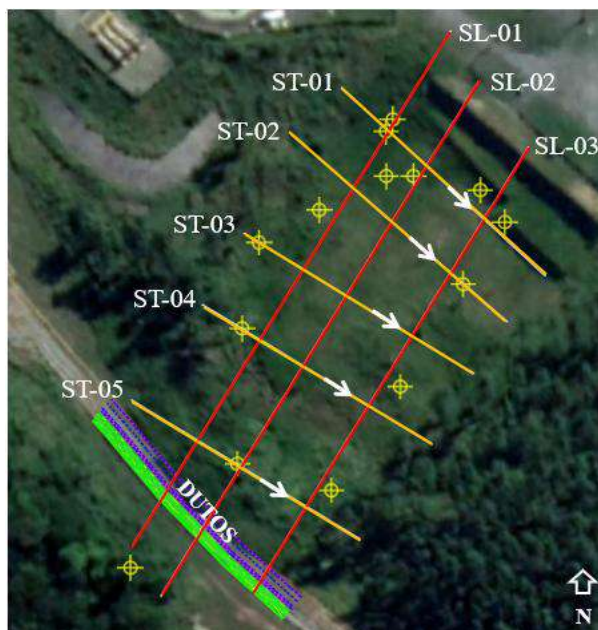


Figura 88 - Seções transversais e longitudinais selecionadas para análise. As setas indicam o sentido da construção dos perfis transversais (da esquerda para direita)

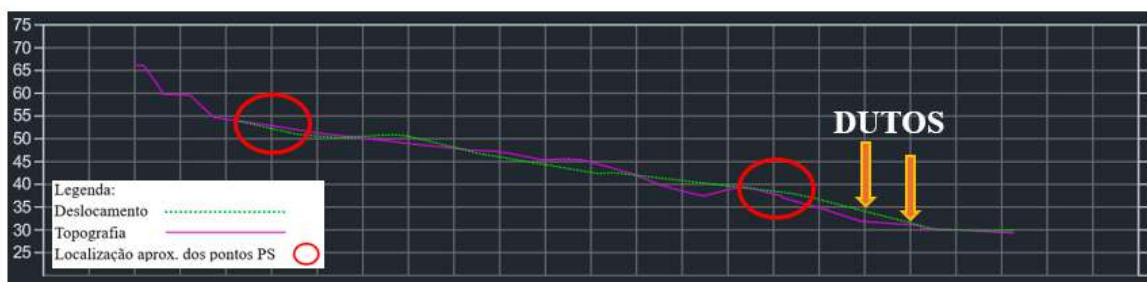
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As seções foram posicionadas de acordo com a localização de alguns pontos PS com o intuito de aprimorar a visualização dos deslocamentos. Desta forma, foram consideradas três seções longitudinais (Figura 89) e cinco seções transversais (Figura 92).

Perfil Longitudinal SL-01



Perfil Longitudinal SL-02



Perfil Longitudinal SL-03

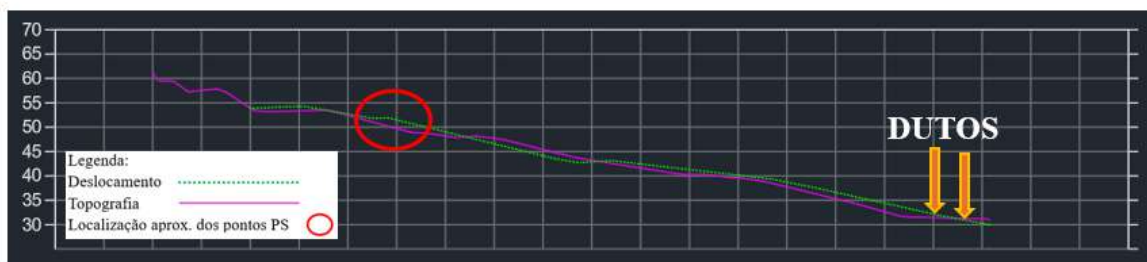


Figura 89 - Perfis longitudinais das seções pré-selecionadas

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para facilitar a visualização dos perfis, foi feita uma alteração da escala na plotagem dos deslocamentos medidos pela técnica PSI. Assim, a medida de deslocamento foi convertida de milímetros para centímetros.

Os perfis longitudinais mostram alguns trechos onde houve recalque e em alguns trechos soerguimento, indicando a movimentação do maciço do tipo translacional e na direção longitudinal SW-NE.

Simões (1991) destaca em seu trabalho algumas retroanálises de deslizamentos planares de camadas de colúvio assentadas em horizontes menos permeáveis. O perfil

construído por Simões (1991) foi então contrastado com o perfil longitudinal SL-02, desenvolvido para o talude em estudo.

O resultado deste comparativo está representado nas Figuras 90 e 91, onde pode-se notar semelhanças nas regiões de recalque e soerguimento em ambos os perfis, indicando que as medições realizadas com a técnica PSI estão condizentes com este tipo de movimento de massa.

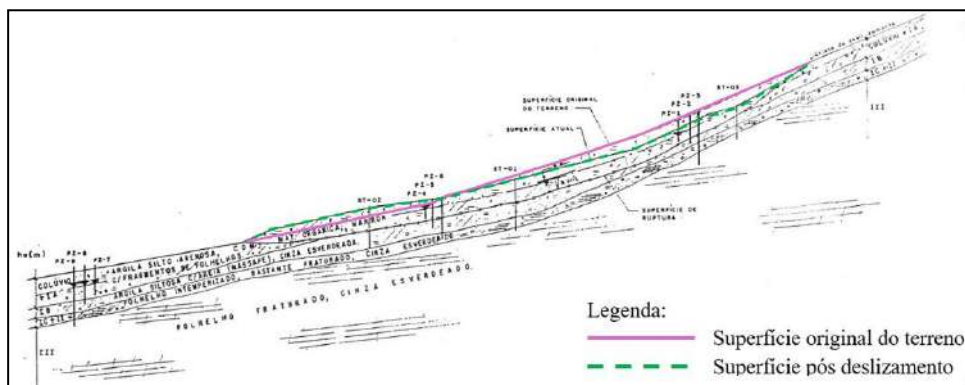


Figura 90 - Exemplo de perfil do deslizamento localizado na Estrada Santo Amaro, formação geológica de Candeias

Fonte: Adaptado de Simões (1991)

Perfil longitudinal SL-02

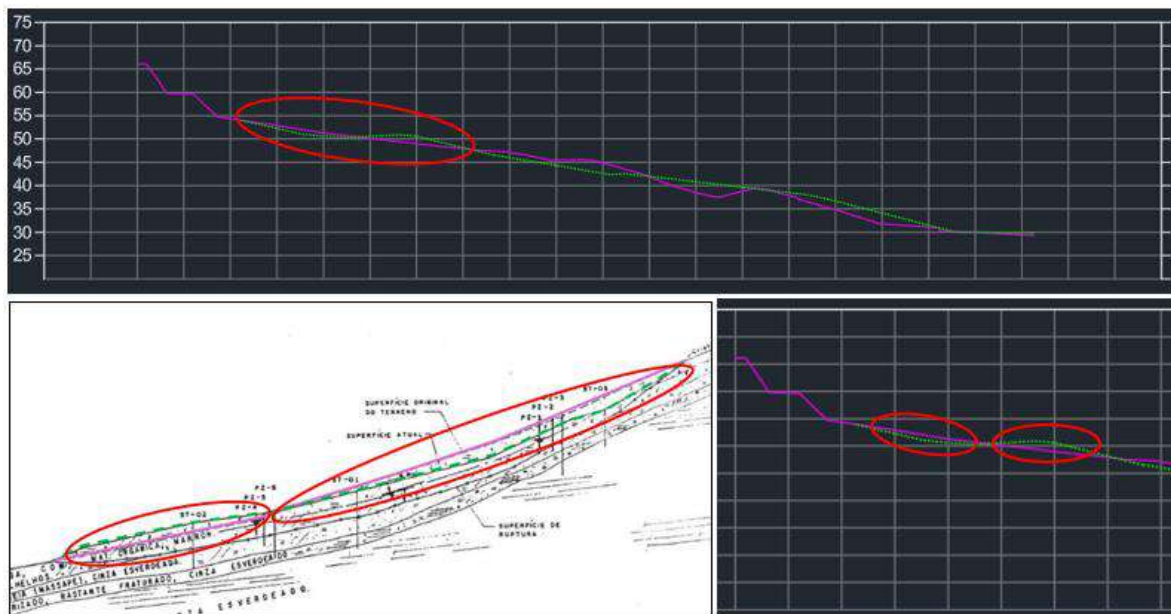
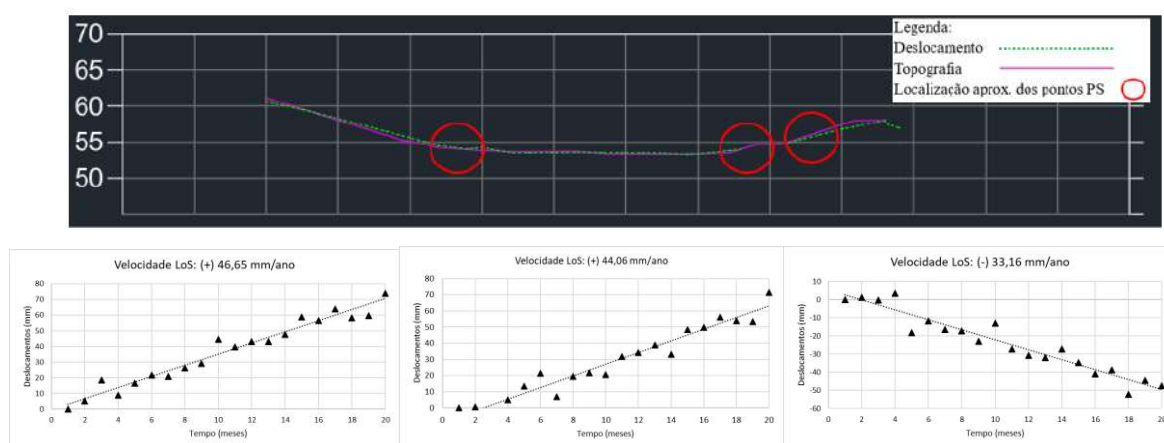


Figura 91 - Perfil SL-02 e comparativo entre os perfis de terreno, destaques indicados em vermelho

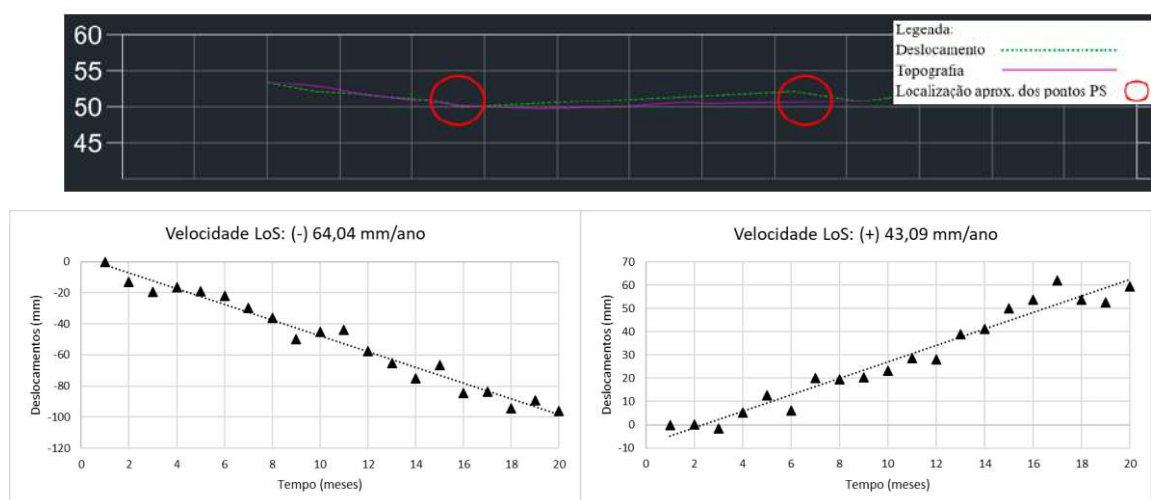
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Juntamente com a apresentação dos perfis transversais foram adicionadas as séries temporais para alguns pontos PS localizados ao longo da seção transversal (Figura 88). Os gráficos mostram as séries temporais de deslocamento (mm) para cada ponto PS e sua respectiva velocidade (mm/ano).

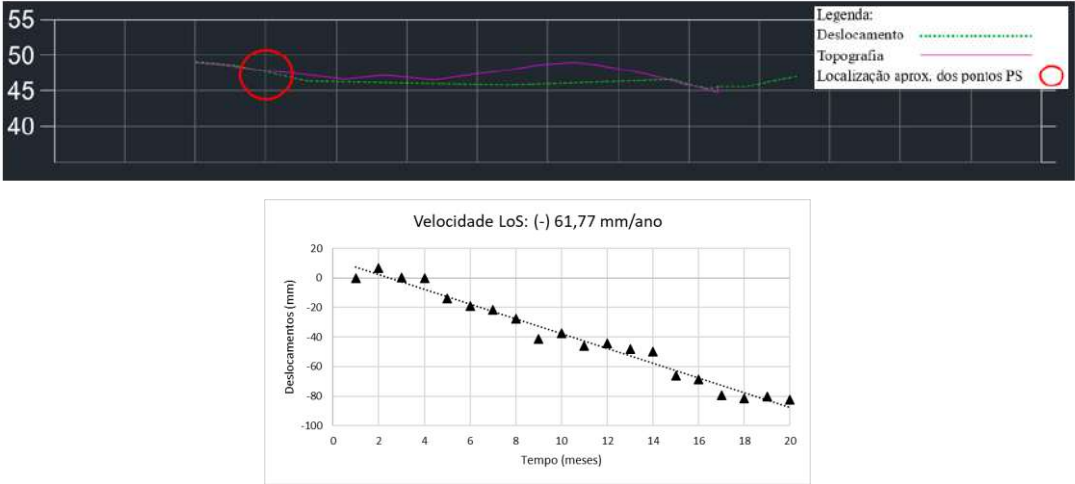
Perfil ST-01



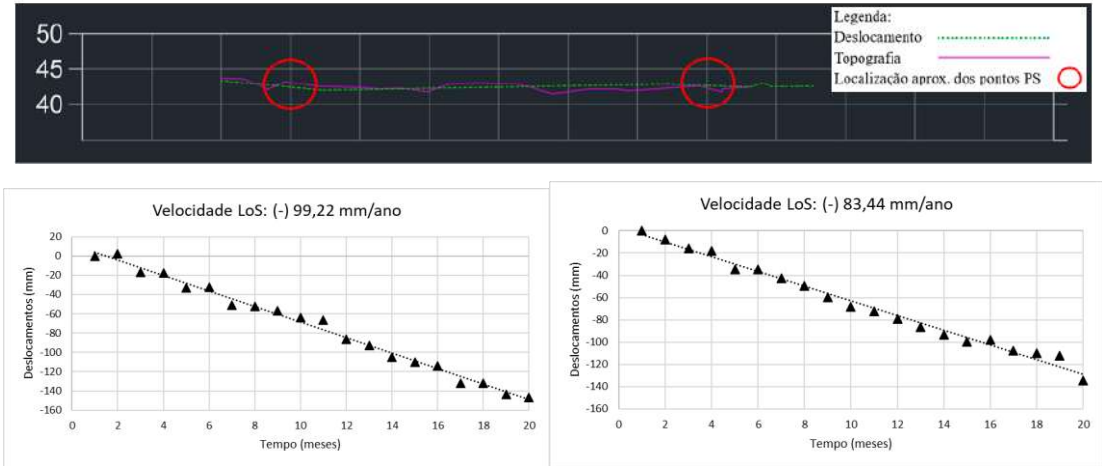
Perfil ST-02



Perfil ST-03



Perfil ST-04



Perfil ST-05

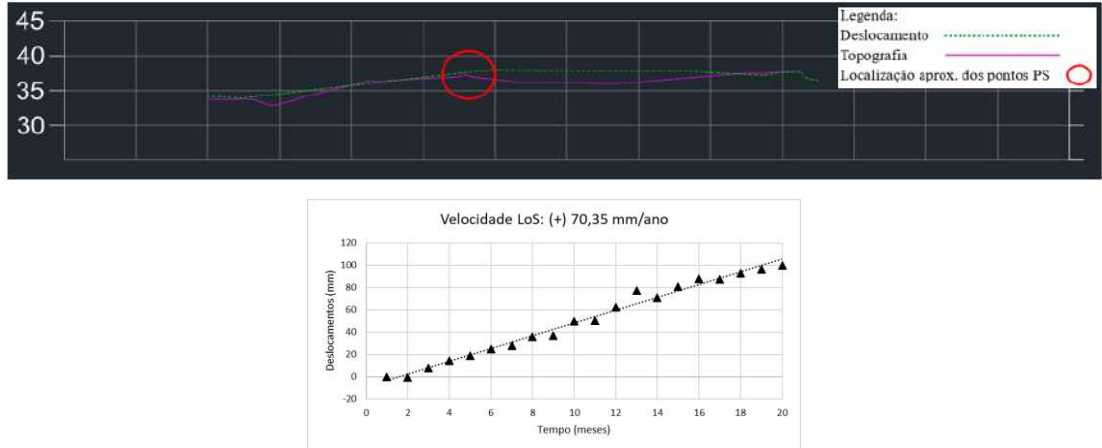


Figura 92 - Perfis transversais das seções pré-selecionadas e séries temporais de deslocamentos (mm) para cada ponto PS e sua respectiva velocidade (mm/ano)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os perfis transversais seguiram o mesmo padrão de movimentação dos perfis longitudinais. Na crista do talude (perfil ST-01) é possível observar deslocamentos tanto de soerguimento na sua porção oeste como recalque na porção leste. Ainda na crista um pouco mais abaixo (perfil ST-02), o sentido do movimento se inverte, sendo a porção oeste submetida a deslocamento de recalque e a porção leste a soerguimento.

Complementando a análise feita com a topografia e com os perfis do terreno, mais um mapa foi criado para apresentar uma visualização complementar dos resultados (Figura 93). Nesta figura foram adicionados os registros fotográficos da movimentação do talude.

Este mapa apresenta uma distribuição dos deslocamentos interpolada, utilizando-se uma interpolação espacial em grade usando o critério de inverso da distância à potência, onde os pontos são ponderados de acordo com o seu peso e distância.

Segundo Razi *et al.* (2018), esta técnica de interpolação é a mais apropriada para ilustrar as condições geológicas do terreno.

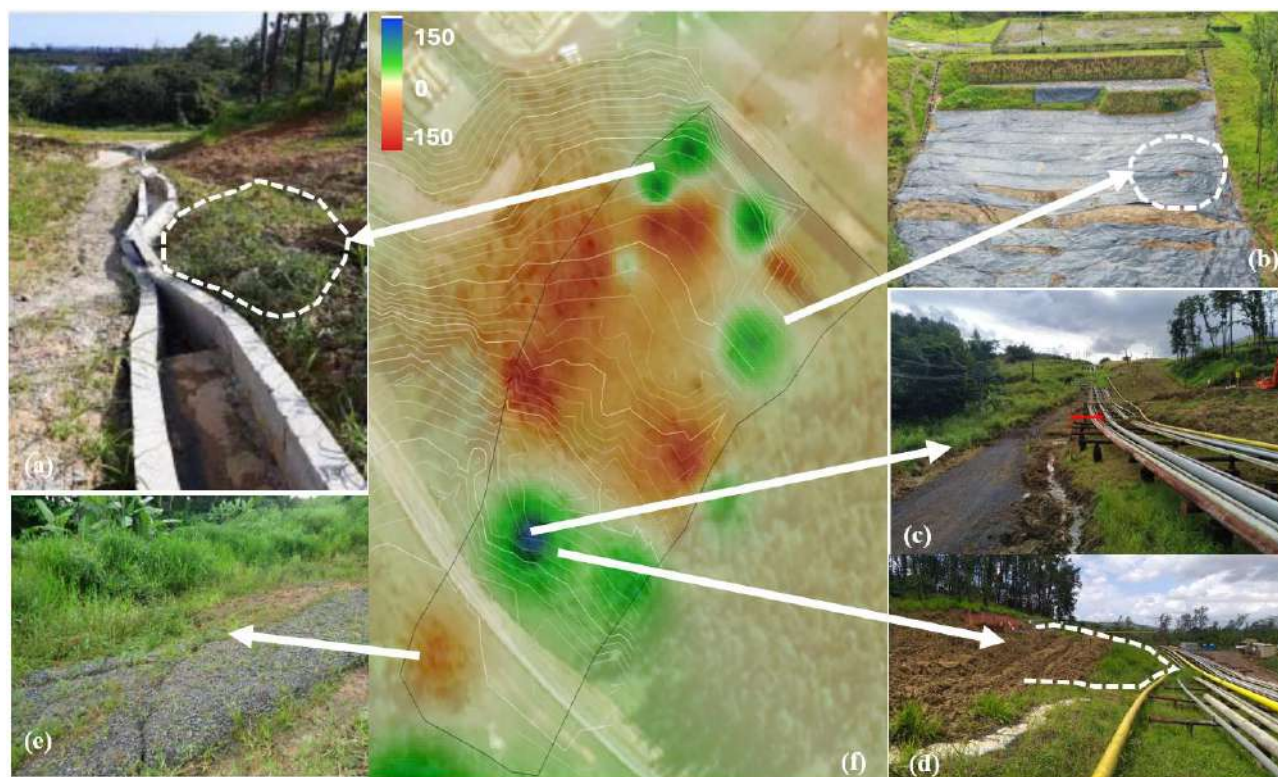


Figura 93 - Mapa de deslocamentos (mm) e registros fotográficos da movimentação do talude.

(a) soerguimento na porção noroeste do talude provocando rompimento de canaleta de drenagem; (b) soerguimento na porção nordeste do talude; (c) soerguimento causando movimentação dos dutos localizados na base do talude (vista direção NO-SE); (d) soerguimento causando movimentação dos dutos localizados na base do talude (vista direção SE-NO); (e) recalque a jusante do talude causando trincas em estrada de acesso; (f) mapa de deslocamentos

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Apesar de não haver dados de medições dos deslocamentos em campo, foi possível, através de fotos de vistoria realizada no local, verificar a movimentação do talude. Pode-se perceber que este deslocamento provocou o movimento dos dutos causando claras tensões de flexão nos mesmos.

Além do aumento das tensões de flexão, foram observados movimentos nos suportes da tubovia (Figura 94), o que pode ter agravado a flexão nos dutos. Levantamento topográfico realizado no local mediu deslocamentos horizontais de alguns suportes da ordem de 2,0 m. Movimentos de rotação dos suportes também foram percebidos.

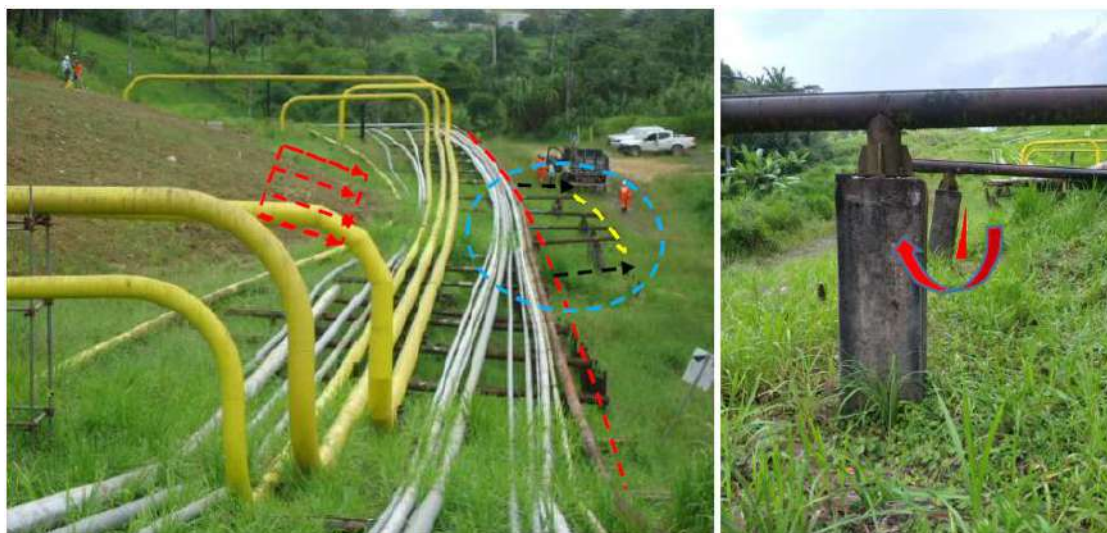


Figura 94 - Vista do desalinhamento e rotação dos suportes

Fonte: Transpetro (2021)

Uma inspeção visual também indica o aparecimento de trincas e abatimentos na estrada de serviço à jusante da tubovia (Figura 93f), sugerindo que os limites da superfície de deslizamento possam englobá-la ou ainda que possa apresentar superfície de ruptura independente.

Conforme relatório técnico feito no local, o talude de jusante apresenta geometria e substrato semelhantes a encosta de montante. Sondagens realizadas indicam que a camada resistente se encontra de 2 a 3 m, enquanto no talude de montante é da ordem de 6 m.

Importante observar que não foi possível determinar os movimentos nas direções horizontais e verticais, pois não é possível conhecer a direção completa do deslocamento, uma vez que, as imagens de satélite utilizadas no presente trabalho foram tomadas somente no sentido de órbita descendente, impossibilitando a obtenção do vetor deslocamento real da superfície.

Mura *et al.* (2021), destacam que esta limitação está relacionada à capacidade de medir deformações ao longo da linha de visada do sensor. Assim, como somente movimentos ao longo da linha de visada do radar podem ser detectados, as deformações detectadas ficam restritas às movimentações da superfície ao longo do plano *slant-range* dos azimutes de visada. Uma forma possível de resolver essa limitação seria o uso combinado de aquisições em órbitas ascendente e descendente como uma forma de se obter os deslocamentos na direção vertical e horizontal. Especificamente para a Área de Interesse não há imagens disponíveis para órbitas ascendentes de Sentinel-1.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Procurou-se ao longo desta pesquisa avaliar o uso da técnica DInSAR como ferramenta complementar aos métodos convencionais de monitoramento geotécnico de faixas de dutos. Esta técnica já vem sendo utilizada para medições de movimentações na superfície terrestre e, desta forma, para diversos tipos de monitoramento. Desde medições de subsidência causadas ou por exploração de recursos minerais ou por obras de engenharia (principalmente túneis), até o acompanhamento de deslocamentos em estruturas de terra, como barragens, pilhas de estéril e taludes de cavas.

O primeiro desafio a ser superado foi relativo à característica da superfície na Área de Interesse foco desta pesquisa. A existência predominante de cobertura vegetal na área trouxe consequências à viabilidade da utilização da técnica DInSAR clássica na medida de deslocamentos neste tipo de terreno. A grande quantidade de regiões com baixa coerência interferométrica acabou prejudicando a aplicação da técnica clássica, pois, como visto na pesquisa, a variável da coerência está diretamente ligada à qualidade dos interferogramas e sua respectiva confiabilidade na medida dos deslocamentos.

Uma segunda técnica foi abordada com o objetivo de solucionar a questão da baixa coerência interferométrica. Uma das técnicas de interferometria de espalhadores persistentes (PSI) foi então utilizada devido a sua propriedade de melhorar a detecção de deformações em regiões de baixa coerência interferométrica. Decidiu-se pela utilização da técnica PSI por meio do *software* SARproZ. Sua interface mais amigável e a não necessidade de conhecimentos mais aprofundados em programação foram seus diferenciais para aplicação da técnica, apesar do programa não ser aberto e gratuito.

Apesar da falta de levantamentos de campo mais precisos, como dados gerados por inclinômetros ou marcos superficiais, por exemplo, foi possível confirmar a viabilidade do uso do InSAR na medição de deslocamentos de um talude. Os resultados gerados pelo programa SARproZ se mostraram satisfatórios quando comparados com o levantamento topográfico existente e com as evidências de movimentação do maciço, apresentadas através de fotos e informações complementares levantadas em inspeção técnica no local realizada pela operadora da faixa.

Considerando ser uma característica das faixas de dutos a presença de vegetação e que desta forma esta particularidade, juntamente com o alcance da banda C utilizada pelo satélite Sentinel-1, tenha ocasionado as limitações relacionadas, pode-se ressaltar que a utilização da técnica DInSAR, em conjunto com as informações de campo, pode se mostrar eficaz no monitoramento de taludes e na avaliação da integridade de dutos. A utilização desta técnica, juntamente com outras formas de monitoramento, pode proporcionar uma otimização na utilização de recursos para operação e manutenção das faixas de dutos. Atividades de prevenção e de intervenções diretas na faixa poderão ser sistematizadas, procurando diminuir-se os riscos de acidentes, com consequentes perdas financeiras e ambientais. A Transpetro, a TBG e possíveis outros operadores podem utilizar a tecnologia InSAR para otimizar suas operações.

O uso de imagens de satélite e de programas de processamento gratuitos cria uma facilidade do ponto de vista operacional e financeiro, já que grandes extensões de faixa podem ser analisadas a quilômetros de distância e com menos recursos.

Como sugestão de trabalhos futuros, pode ser avaliada a utilização da técnica PSI com a abordagem Q-PS (*Quase-Persistent Scatterer Interferometry*). Segundo Razi *et al.* (2018) esta metodologia é mais avançada considerando a técnica PSI tradicional, pois possibilita a extração de informação de alvos parcialmente coerentes. Sua vantagem principal é o aumento da distribuição espacial de pontos PS, ampliando assim a densidade dos candidatos a espalhadores persistentes (PSC) em áreas vegetadas.

Por fim, uma outra possibilidade futura de pesquisa é a aplicação da técnica InSAR com a utilização de drones equipados com radares para coleta de imagens SAR de alta resolução, e assim aprimorar as análises de movimentação de solo. Apesar de limitações quanto a precisão da trajetória da plataforma de voo, que podem impactar na resolução do sensor SAR e, consequentemente, na qualidade das imagens, sistemas SAR em drones de alta altitude podem se beneficiar da precisão da trajetória conseguidas em altitudes maiores. Sun *et al.* (2024) citam as vantagens significativas, incluindo a capacidade de operar em condições climáticas adversas, coleta rápida de dados e modelagem 3D detalhada, especialmente quando ângulos de visão oblíquos são cruciais. O potencial para o uso de sensores SAR de pequeno porte ainda é muito promissor, dado seu desenvolvimento no design de sensores e aplicação em deslizamentos de terra, onde drones multirrotores de baixo custo podem servir como uma plataforma viável.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. S. S. *et al.* **Monitoramento geotécnico de um duto enterrado em encosta.** In: Rio Pipeline 2003. Anais. Rio de Janeiro: 2003.

ALVES, S. C., KRUEGER, C. P., DALAZOANA, D. **Técnica PSInSAR na avaliação de deslocamentos: uma análise conceitual, aplicações e perspectivas.** Revista Brasileira de Cartografia. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. Vol. 75. 2023.

AMARAL, C. S., SOUZA FILHO, B. G., MUSMAN, J. V. R., GOMES, M. G. F. M. **Field stress monitoring in pipelines submitted to ground movement.** In: International Congress & Exposition on Experimental & Applied Mechanics, 10. Costa Mesa: Society for Experimental Mechanics, 2004.

ANSAR, A. M. H., DIN, A. H. Md, LATIP, A. S. Ab, REBA, M. N. Md. **A short review on persistent scatterer interferometry techniques for Surface deformation monitoring.** The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVI-4/W3. 2021.

ATANASOVA, M., NIKOLOV, H., PASHOVA, L. **Application of InSar satellite method for mapping of active landslides in Bulgaria - opportunities and perspectives.** 30th International Cartographic Conference (ICC 2021), 14–18 December 2021, Florence, Italy.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica.** 1ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (1º COBRAE), Anais, ABMS/ABGE, v. 2, 721-733, 1992.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela.** 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. **Estabilidade de taludes**. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (ed.) *Geologia de Engenharia*, São Paulo: ABGE, cap. 15, p. 243-269, 1998.

BOARETO, R. **A política de mobilidade urbana e a construção de cidades sustentáveis**. *Revista dos Transportes Públicos* – São Paulo: ANTP, pp. 143-160. 2008.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas do Brasil – Unidades de relevo**. Rio de Janeiro, 2011.

BRASIL ESCOLA. **O que é uma onda?** Artigo publicado no site <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-onda.htm>. Acesso em 1/12/2024.

BURGMANN, R.; ROSEN, P.A.; FIELDING, E.J. **Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation**. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* v. 28. p. 169-209, 2000.

CCRS, (COMM). **Fundamentals of remote sensing**. Canada Centre for Remote Sensing Tutorial. 1999.

COUTINHO, J. B. L. **Geologia. em Santa Catarina**. Secretaria de Estado de Coordenação Geral e Planejamento. Atlas Escolar de Santa Catarina. Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 1991.

CROSETTO, M., BIESCAS, E., CRIPPA, B., MONSERRAT, O. **Land deformation monitoring using SAR interferometry: State-of-the-art**. *Photogrammetrie - Fernerkundung – Geoinformation*. 2005.

CRUDEN, D. M. **A simple definition of landslide**. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, n.43, p.27-29. 1991.

CRUDEN D. M., VARNES D. J. **Landslide types and processes**. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides investigation and mitigation*. Transportation research board, US National Research Council. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3, pp. 36–75. 1996.

CRUZ, G. M. B. G. **Site scale slow moving landslides: characterization by monitoring and modelling**. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas ao Meio Ambiente). Universitas Almeriensis. Almería. 2018.

CURLANDER, J.C.; MCDONOUGH, R.N. **Synthetic aperture radar systems and signal processing**. New York: John Wiley & Sons. 647p. 1991.

DOBSON, M. C. **Forest Information from synthetic aperture radar**. Journal of Forestry. N.98, p.41-43, 2000.

ERICKSON, R. **Stripmap mode synthetic aperture radar imaging with motion compensation**. 104 p. Dissertação de Mestrado - KTH Signals, Sensors System, Estocolmo - Suécia, 2005.

ESA. Agência Espacial Europeia. **Overview of Sentinel-1 mission**. Disponível em <<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission>>. Acesso em 04/05/2025.

FÁROVÁ, K., JELÉNEK, J., KOPACKOVÁ-STRNADOVÁ, V., KYCL, P. **Comparing DInSAR and PSI techniques employed to Sentinel-1 data to monitor highway stability: a case study of a massive Dobkovicky landslide**, Czech Republic. Remote Sens, 11, 2670. 2019

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. do. **Movimentos de massa; uma abordagem geológica-geomorfológica**. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. Cap. 3.

FERRETTI, A., MASSONET, D., MONTI, GUARNIERI A., PRATI, C., ROCCA, F. **InSAR principles: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation**. 2007. ESA TM-19. Disponível em <https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/11.0.0/snap-toolboxes/eu.esa.microwavetbx.sar.op.insar.ui/operators/PhaseToDisplacementOp.html>. Acesso em 27/12/2024.

FRANCESCHETTI, G. E LANARI, R. **Synthetic aperture radar processing**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. 307p

GABOARDI, C. **Utilização de imagem de coerência sar para classificação do uso da terra: floresta nacional do Tapajós.** 137p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), São José dos Campos: INPE, 2002.

GENS, R.; VAN GENDEREN, J. L. **SAR interferometry – issues, techniques, applications.** International Journal of Remote Sensing. v.17. p. 1803-1835, 1996.

GIRGIN, S.; NECCI, A., KRAUSMANN, E. **Dealing with cascading multi-hazard risks in national risk assessment: The case of Natech accidents.** International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 35, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101072>

GLASER S. H., BÜRGMANN, R., ZEBKER, H. A. **InSAR coherence analysis and estimation of hydrogeological parameters in a tectonically active region: Mammoth Lakes Basin, California.** Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Volume 107, 2002 - Edição B11.

GOBLIRSCH, W.; PASQUALI, P. **Algorithms for calculation of digital surface models from the unwrapped interferometric phase.** In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Lincoln, 1996. Proceeding. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 1, p. 656-658.

GUIDICINI, G. NIEBLE, C. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** 2ª Ed. Editora Blucher. 1984.

HANSSEN, R. F. **Radar interferometry, data interpretation and error analysis.** 2a ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.

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.** 270 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos. São Paulo. 2014.

HIGHLAND, L. BOBROWSKY, P. **The landslide handbook – a guide to understanding landslides.** Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129p. 2008.

HOOPER, A. J. **Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modelling of volcanic deformation**. 2006 144f. Thesis (PhD). Department of Geophysics, Stanford University. 2006.

HUNGR, O., LEROUÉIL, S., PICARELLI, L. **The Varnes classification of landslides types, an update**. Landslides. Vol. 11: 167-194. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014.

INFANTI JUNIOR, N., FORNASARI FILHO, N. **Processos de dinâmica superficial**. In: OLIVEIRA, A.M.S., BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). cap. 9, p.131-152. 1998.

KAJUNA, P. M. M., PARK H., KIM, S. W., CHOI, J. H. **Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) coherence analysis and integration with optical data for land-cover classification mapping in Tanzania**. International Journal of Remote Sensing, Volume 32, 2011 - Edição 24

KAMPES, B.M. **Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry**. TU Delft, Delft University of Technology. 2005.

KUMAR, S., KUMAR D., CHAUDHARY, S., SINGHI, N., MALIK, K. **Land subsidence mapping and monitoring using modiBed persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar**. in Jharia CoalBeld, India. Journal of Earth Science. (129 146). 2020.

LACERDA, W. A. **Stability of natural slopes along the tropical coast of Brazil**. In: Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Balkema, Rio de Janeiro, pp. 17-40. 1997.

LACERDA, W. A. NETTO, A. C. SATO A. M. **Technical report on landslide related disasters in Brazil**. 10.1201/9781315387789-4, 2016.

LANA, J., FACURI, G., OLIVEIRA, M. **Avaliação Geotécnica dos Atrativos Turísticos do Monumento Natural Cânions do Subaré, Santo Amaro, BA**. Serviço Geológico do Brasil - CPRM (SGB). Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial. 48p. 2022.

LANARI, R., CASU, F., MANZO M., ZENI G., BERARDINO P., MANUNTA M., PEPE A. **An overview of the small baseline subset algorithm: a dinsar technique for surface deformation analysis.** In: Wolf, D., Fernández, J. (eds) *Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change*. Pageoph Topical Volumes. Birkhäuser. 2007.

LEE, S. E.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications.** CRC Press: Taylor & Francis Group, 398 p. 2009.

MACCARDLE, A. *et al.* **Pipeline monitoring with interferometry in non-arid region.** In: Rio Pipeline Conference & Exposition, 2005, Rio de Janeiro. Proceedings. Brazil. 2005

MALTEZ, J. S. **Estudo da análise de risco ambiental na operação de duto terrestre, considerando alterações geológico-geotécnicas na faixa de dutos e áreas adjacentes.** Projeto de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013

MARQUES, M. L., FERREIRA, M., RIEDEL, P. **Monitoramento de faixa de dutos: uma abordagem que utiliza técnica de detecção de mudanças e imagens de alta resolução espacial.** Geografia, Rio Claro, v. 38, n. 3, p. 455-473, set/dez 2013.

MASSONNET, D.; FEIGL., K.L. **Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface.** Reviews of Geophysics. v. 36(4). p. 441-500, 1998.

MENDONÇA, M. B.; SILVA D. R. **Integration of census data based vulnerability in landslide risk mapping - the case of Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brazil.** Amsterdam: ELSEVIER - International Journal of Disaster Risk Reduction. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420920313868>. Acessado em: 10 Dez. 2020.

MICHAELSEN, F. M. **Riscos geotécnicos em dutos: instrumentação para monitoramento de oleodutos e gasodutos em encostas instáveis.** Projeto de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

MOORE, R.K. **Radar fundamentals and scatterometers**. In: COLWELL, R.N. (Ed.). Manual of remote sensing: theory, instruments and techniques. 2. ed., Falls Church, U.S.: American Society of Photogrammetry. p. 369-427. v. I, Chapter 9. 1983.

MOREIRA, A.; PRATS-IRAOLA, P.; YOUNIS, M.; KRIEGER, G.; HAJNSEK, I.; PAPATHANASSIOU, K. P. **A tutorial on synthetic aperture radar**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. p. 6-43, March, 2013.

MORGENSTERN, N. R. **The evaluation of slope stability: a 25 year perspective**. In: Seed RB, Boulanger RW (eds) Stability and performance of slopes and embankments, ASCE Geotechnical Special Publication 31, 1:1–26. 1992

MURA, J. C. **Mapeamento topográfico por interferometria utilizando imagens SAR do ERS-1**. In: SIBGRAPI, 5., 1992. Águas de Lindóia. Anais. Águas de Lindóia: SBC, 1992, p. 61-64

MURA, J. C., GAMA, F. F., PARADELLA, W. R. **Monitoramento DInSAR para mineração e geotecnia**. Oficina de Textos. São Paulo, 2021.

NETO, J. L. S. **Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro**. Revista Brasileira de Climatologia, v.1, n.1, 2005.

NIEVINSKI, F. G. **Interferometria por radar de abertura sintética (InSAR)**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Cartográfica. Instituto de Geociências. Departamento de Geodésia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2004.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto princípios e aplicações**. 2ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, ISBN 85-212-0057-9;297P. 1995.

OLIVEIRA, H. R. **Gerenciamento da integridade de dutos: proposta de abordagem aos riscos geotécnicos em gasodutos de transmissão**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Catarina, 2005.

PERISSIN, D., WANG, Z., WANG, T. **The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China.** ISRSE (International Symposium on Remote Sensing of environment) 2011, Sidney, Australia, 2011.

PETROBRAS. **Implantação de faixas de dutos terrestres: N-2624.** Rio de Janeiro, 2014.

PETROBRAS. **Construção, montagem e condicionamento de duto terrestre: N-464.** Rio de Janeiro, 2016.

PETROBRAS. **Relatório técnico – estabilização da encosta faixa CONDE-RLAM.** 2020.

PICARELLI, L.; MANDOLINI, A.; GIUSTI, G. **Interaction between slow active landslides and pipelines.** Ninth international symposium on landslides. Workshop on Landslides and lifelines – submarine landslides affecting pipelines and lifelines in slow moving slides in areas prone to debris flow events. 2004.

RAZI, P., SUMANTYO, J., PERISSIN, D., KUZE, H. **Long-Term land deformation monitoring using Quasi-Persistent Scatterer (Q-PS) technique observed by Sentinel-1A: case study Kelok Sembilan.** Advances in Remote Sensing, 7, 277-289. 2018.

ROSA, R. A. S. **Desenvolvimento de um algoritmo de desdobramento de fase para radar de imagens interferométrico aerotransportado utilizando uma linha de base.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

ROTT, H., NAGLER T. **The Contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards.** Advances in Space Research, Vol. 37, 710-719, 2006.

SANTOS, A. R. **A grande barreira da serra do mar.** 1 ed. São Paulo: Nome da Rosa. 123 p. 2004.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and process.** Oxford University Press, 451p. New York. 1993.

SHARPE, C. F. S. **Landslides and related phenomena**. Columbia University Press, New York. 1938

SILVA, A. Q. **Avaliação de imagens SAR no mapeamento de crostas lateríticas do depósito N1, província mineral de Carajás, Pará**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos – SP. 2010.

SIMÕES, P. R. M. **Mecanismos de Instabilização dos Taludes Naturais das Formações Expansivas da Bacia Sedimentar do Recôncavo Baiano**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro. 1991

Site da TBG. **Traçado do gasoduto Bolívia-Brasil**. <https://www.tbq.com.br/tra%C3%A7ado-do-gasoduto>. Acesso em 15/10/24

Site da Transpetro. **Dutos e Terminais**. <https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/nossas-atividades/dutos-e-terminais.htm>. Acesso em 15/10/24

SOARES, J.; MUSMAN, J. V. R. **Estabilização e monitoramento de encosta em solo coluvionar na Serra do Mar**. In: III CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. Anais. Rio de Janeiro: Perfect Press. 577 p. p. 571-577. 2001

SOUZA, W. 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**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2022.

SOUZA, W. O., REIS, L. G. M., CABRAL, J. J. S. P., RUIZ-ARMENTEROS, A. M., COUTINHO, R. Q., PACHECO, A. P., ARAGÃO JÚNIOR, W. R. **Analysis of urbanization-induced land subsidence in the city of Recife (Brazil) using persistent scatterer SAR interferometry**. Remote Sens. Volume 16. Issue 14. 2024.

SUN, J., YUAN G., SONG, L., ZHANG, H. **Unmanned aerial vehicles (UAVs) in landslide investigation and monitoring: a review**. Drones, 8, 30. MDPI open access journals. 2024.

SUZUKI, S. **Propriedades geomecânicas de alguns solos residuais e coluviais ao longo do oleoduto Curitiba-Paranaguá**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

TIPLER, P.A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros: eletricidade e magnetismo, óptica**. 6. ed. Tradução de: BALZARETTI, N.M. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.2.

TRANSPETRO. **Projeto ORBIG InSAR**. 2007

TRANSPETRO. **Levantamento topográfico faixa CONDE-RLAM**. 2020.

TRANSPETRO. **Relatório técnico de inspeção geológico-geotécnica específica faixa CONDE-RLAM**. 2021.

TREVETT, J. W. **Imaging radar for resources surveys**. New York: Chapman&Hall, 1986.

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive**. vol. II, Boston, USA: Artech House, 1982. p. 816-833

UNISDR - UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION **Terminology on disaster risk reduction**. Genebra, 2009. Disponível em: https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf. Acessado em 10 dez. 2020.

USAI, S.; HANSSEN, R. **Long time scale INSAR by means of high coherence features**. In: ERS SYMPOSIUM “SPACE AT THE SERVICE OF OUR ENVIRONMENT”, Florence, Italy. 17–21 March. Proceedings Florence: ESA Publications, 1997. p. 225–228. 1997.

VANACÔR, R. N. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. Centro Estadual de Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2006.

VARGAS, M. **Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos da Serra do Mar.** Solos e Rochas, São Paulo, volume 22, no. 1, pp.53-83. 1999.

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes.** In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11–33. 1978.

VIANA, D. R. **Uso da interferometria SAR para monitoramento de deslocamentos de taludes – estudo de caso de uma barragem de terra e enrocamento.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Universidade Federal do Rio de Janeiro., Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana. Rio de Janeiro. 2023

WALTER, T. R., PAROLAI, S., WANG, R. **Coherence optimization in multi-temporal InSAR time series analysis: an application to the Maule earthquake in Chile.** Remote Sensing of Environment, Volume 115, 2011

WERNER, C., WEGMULLER, U., STROZZI, T., WIESMANN, A. **Interferometric point target analysis for deformation mapping.** IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS. 2003.

WOLLE, C. M., CARVALHO, C. S. **Taludes naturais.** In: FALCONI, F. F.; JUNIOR, A. N. (Org.), Solos do Litoral de São Paulo. São Paulo: ABMS, p. 180-203, 1994.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing.** Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 370p.

WP/WLI. **A suggested method for describing the rate of movement of a landslide** International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. Bull Inter Assoc Eng Geol 52:75–78, 1995.

XIA, Y. **Synthetic aperture radar interferometry**. In: XU, G. (Ed.). Sciences of Geodesy - I: advances and future directions. Berlin Heidelberg: Springer, Chapter 11, 2010. 415-474p.

YALIN, L. G. L.; JIANPINGY. H. W. S. G. **The influence of land urbanization on landslides: An empirical estimation based on Chinese provincial panel data**. Amsterdam: ELSEVIER - Science of the Total Environment, 2017.

YUDINUGROHO, M., ROKHMANA, C. A. **Detection of surface deformation in Opak fault Ogyakarta using Quasi-Persistent scatter interferometry synthetic aperture radar**. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 739, 2021.

ZEBKER, H. A. **Studying the Earth with interferometric radar**. Computing in Science and Engineering, v. 2, n. 3 , p. 52 60, 2000.

ZHANG, S.; XU, D.; SHEN, G.; LIU, J.; YANG, L. **Numerical Simulation of Na-Tech Cascading Disasters in a Large Oil Depot**. Int. J. Environ. Res. Public Health 2020, 17, 8620. Disponível em <<https://doi.org/10.3390/ijerph17228620>>. Acesso em: 15 mar. 2024