



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE ENGENHARIA URBANA

Deivid Reis Viana

**USO DA INTERFEROMETRIA-SAR PARA O MONITORAMENTO DE
DESLOCAMENTOS DE TALUDES - ESTUDO DE CASO DE UMA BARRAGEM DE
TERRA E ENROCAMENTO**

Rio de Janeiro

2023



UFRJ

DEIVID REIS VIANA

**USO DA INTERFEROMETRIA-SAR PARA O MONITORAMENTO DE
DESLOCAMENTOS DE TALUDES - ESTUDO DE CASO DE UMA BARRAGEM DE
TERRA E ENROCAMENTO**

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

Orientadores:

Marcos Barreto de Mendonça
Wagner Barreto da Silva

Rio de Janeiro

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

VIANA, D R.

Uso da interferometria SAR para o monitoramento de deslocamentos de taludes - estudo de caso de uma barragem de terra e enrocamento, Rio de Janeiro, 2023.

Nº de páginas: 124

Área de concentração: Engenharias I.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Barreto de Mendonça e Prof Dr. Wagner Barreto da Silva

Dissertação Mestrado em Engenharia Urbana – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Rio de Janeiro, 2023

1. Geotecnologias; 2. Interferometria diferencial; 3. Radar de abertura Sintética



UFRJ

**USO DA INTERFEROMETRIA-SAR PARA O MONITORAMENTO DE
DESLOCAMENTOS DE TALUDES - ESTUDO DE CASO DE UMA BARRAGEM DE
TERRA E ENROCAMENTO**

Deivid Reis Viana

Orientadores:

Marcos Barreto de Mendonça
Wagner Barreto da Silva

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

Aprovado pela Banca:

Presidente, Marcos Barreto de Mendonça - PEU/POLI/UFRJ

Wagner Barreto da Silva - DSG/EB

Leandro Torres Di Gregorio - PEU/POLI/UFRJ

Maria do Carmo Reis Cavalcanti - DCC/POLI/UFRJ

Matheus Pinheiro Ferreira - IME/EB

Rio de Janeiro
2023

DEDICATÓRIA

Aos Mestres com carinho
A minha família pelo tempo que deixamos de estar juntos...
Aos meus pais, Jacy e Maria, a eles todos os créditos...

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Agência Espacial Europeia, pela cessão dos dados e software usados.

Aos Professores Dr. Marcos Barreto de Mendonça e Dr. Wagner Barreto da Silva por todo o apoio e pela orientação.

À FURNAS pela disponibilidade dos dados aqui publicados permitindo assim o desenvolvimento do tema. Em especial gostaria de agradecer aos engenheiros M.Sc. Carlos Antônio Reis da Silva, M.Sc. Carlos Henrique Oliveira da Rocha e Ademar de Brito Filho (em memória), todos da Divisão de Instrumentação e Suporte Tecnológico - DIST. de FURNAS.

Aos professores do Programa de Engenharia Urbana pela construção e disseminação do conhecimento.

Sobre todas as coisas, à DEUS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição de um talude.....	6
Figura 2 - Representação da queda e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência	8
Figura 3 – Representação do tombamento e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência.	8
Figura 4 - Representação do rolamento e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência.....	9
Figura 5 - Representação do deslizamento e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência	9
Figura 6 - Representação do fluxo de lama e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência.....	10
Figura 7 - Representação da subsidência e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência.	11
Figura 8 - Registros de movimento de massa no Brasil de 1991 a 2012.....	12
Figura 9 – Desenhos esquemáticos dos elementos que constituem uma barragem de terra (a) e de seções transversais de barragens de terra e enrocamento (b).	14
Figura 10 – Imagens de marcos superficiais.....	21
Figura 11 - Nivelamento geométrico e a diferença de cota entre marcos superficiais situados nos pontos A e B.....	21
Figura 12 - Padrão geral de deslocamentos horizontal dos taludes de uma barragem de terra.....	23
Figura 13 - Padrão geral de deslocamentos ao longo da seção de máxima altura de uma barragem.....	24
Figura 14 - Padrão geral de deslocamentos ao longo do eixo de uma barragem de terra.	24
Figura 15 - Elementos de ondas.	2
Figura 16 - 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.....	2
Figura 17: Comprimento e frequência de ondas no espectro eletromagnético.....	3
Figura 18 - Polarização horizontal e vertical da onda plana eletromagnética	4
Figura 19 - Sinal SAR complexo - amplitude e fase resultantes.....	5
Figura 20 - Principais sistemas orbitais com SAR e suas características.	6
Figura 21 - Geometria de aquisição de imagens do sistema SAR.....	7
Figura 22 - Elementos básicos de um sistema radar	8
Figura 23 - Formação de imagem de radar	8
Figura 24 - Resolução na direção de alcance direto do radar.	10
Figura 25 - Representação geométrica do posicionamento de um ponto P na superfície imageada em tempos distintos.....	13
Figura 26 - Modos de aquisição do par interferométrico: (a) uma passagem; (b) duas passagens.....	13
Figura 27 – Corregistro de imagens	15
Figura 28 - Representação da contribuição da terra plana para a fase interferométrica.	18
Figura 29 - (a) Interferograma com a presença da fase de terra plana e (b) Interferograma com a fase de terra plana removida.	18

Figura 30 - Reflectância da imagem simulada em função do declive local do terreno	19
Figura 31 - a) Satélite Sentinel e b) Constelação Sentinel	24
Figura 32 - Configuração dos diferentes modos de aquisição do Sentinel 1.....	25
Figura 33 - Faixas de imageamento do Sentinel 1.....	26
Figura 34 - Área de extensão da imagem.	26
Figura 35 - Faixas e subfaixas de imageamento da região de interesse do presente estudo.....	27
Figura 36 - Construtor gráfico de processamento automático para a geração dos mapas de interesse – Etapa 1	28
Figura 37 - Obtenção do mapa de coerência.....	29
Figura 38 - Construtor gráfico de processamento automático para a geração dos mapas de interesse – Etapa 2	29
Figura 39 - Construtor gráfico de processamento automático para a geração dos mapas de interesse – Etapa 3	30
Figura 40 – Obtenção do mapa de deslocamento	30
Figura 41 - (a) Imagem do município de Além Paraíba-MG e (b) barragem monitorada	31
Figura 42 - Projeto executivo do dique - Planta	33
Figura 43 - Projeto executivo do dique – Seção longitudinal	34
Figura 44 - Projeto executivo do dique – Seção transversal B.....	34
Figura 45 - Projeto executivo do dique – Seção transversal C.....	34
Figura 46 - Projeto executivo do dique – Seção transversal D	35
Figura 47 - Projeto executivo do dique – Seção transversal E.....	35
Figura 48 - Legenda dos desenhos das seções transversais e longitudinal do dique	35
Figura 49 - Localização da área e pontos de interesse	36
Figura 50 - Localização dos marcos superficiais (triângulos vermelhos)	36
Figura 51 - Marcos superficiais da barragem.	37
Figura 52 - Resultado matricial da Coerência no segundo semestre de 2017	44
Figura 53 - Resultado matricial da Coerência no primeiro semestre de 2018.....	45
Figura 54 - Resultado matricial da Coerência segundo semestre de 2018	46
Figura 55 - Resultado matricial da Coerência primeiro semestre de 2019.....	47
Figura 56 - Resultado matricial da Coerência segundo semestre de 2019	48
Figura 57 - Disposição dos marcos superficiais e feições do terreno da área de interesse	49
Figura 58 - Ocorrência dos valores de coerência por regiões dos marcos superficiais.	50
Figura 59 - Coerência versus Umidade Relativa 2017 – Crista	51
Figura 60 - Coerência versus Umidade Relativa 2017 – Bermas intermediária e inferior	51
Figura 61 - Deslocamentos verticais absolutos em 2017.....	52
Figura 62 - Deslocamentos verticais absolutos em 2018.....	53

Figura 63 - Deslocamentos verticais absolutos em 2019	53
Figura 64 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no primeiro semestre de 2017	55
Figura 65 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no primeiro semestre de 2018	56
Figura 66 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no segundo semestre de 2018	57
Figura 67 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no primeiro semestre de 2019	58
Figura 68 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no segundo semestre de 2019.	59
Figura 69 - Deslocamentos superficiais absolutos InSAR versus nivelamento – Crista	61
Figura 70 - Deslocamentos superficiais absolutos InSAR versus nivelamento -Berma intermediária..	61
Figura 71 - Deslocamentos superficiais absolutos InSAR versus nivelamento -Berma inferior	62
Figura 72 - Deslocamentos relativos ao longo do tempo – Crista.....	64
Figura 73 - Deslocamentos relativos ao longo do tempo – Bermas	64
Figura 74 - Deslocamentos relativos sobre o perfil longitudinal - 2017	65
Figura 75 - Deslocamentos relativos em 2018 sobre o perfil longitudinal.....	66
Figura 76 - Deslocamentos relativos em 2019 sobre o perfil longitudinal.....	67
Figura 77 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-01	70
Figura 78 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-02	70
Figura 79 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-03	70
Figura 80 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-06	70
Figura 81 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-07	71
Figura 82 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-10	71
Figura 83 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-04	71
Figura 84 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-08	71
Figura 85 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-11	72
Figura 86 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-05	72
Figura 87 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-09	72
Figura 88 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-12	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação simplificada dos movimentos em encostas.	7
Tabela 2 - Periodicidade de inspeções de segurança.....	17
Tabela 3 - Faixa típica de deslocamentos verticais após o término da construção	25
Tabela 4 - Bandas na faixa das micro-ondas.....	4
Tabela 5 - Limiares de coerência	17
Tabela 6 – Referências sobre a aplicação de InSAR no monitoramento de barragens.	22
Tabela 7 - Parâmetros dos modos de aquisição da missão Sentinel-1	25
Tabela 8 - Coordenadas dos pontos de interesse.....	37
Tabela 9 - Composição de pares interferométricos e linhas de base perpendicular e temporal	38
Tabela 10 – Valores de Coerência dos Pares Interferométricos – 2017.....	41
Tabela 11 - Valores de Coerência – 2018.....	42
Tabela 12 - Valores de Coerência – 2019	43
Tabela 13 – Comparação entre deslocamentos observados através de InSAR e nivelamento geométrico	62

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Tamanho do pulso.....	9
(2) Resolução na direção de alcance.....	10
(3) Fase interferométrica	12
(4) Diferença de fases.....	12
(5) Variação na fase	14
(6) Geração do interferograma	16
(7) Estimativa da coerência	16

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AI	Área de interesse (AI)
ASF	Alaska Satellite Facility
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCRS	CANADA CENTER FOR REMOTE SENSING
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
DAAC	Distributed Active Archive Center
DT	Alvos Distribuídos
EM-DAT	Emergency Events Database
ESA	European Space Agency
ESD	Diversidade Espectral Aprimorada
EW	Extra-Wide Swath Mode
GPS	Global Positioning System
ICOLD	International Commission on Large Dams
InSAR/IfSAR/ISAR	Interferometria por radar de abertura sintética
IW	Interferometric Wide Swath Mode
MDE	Modelo digital de elevação
MIN	Ministério da Integração Nacional
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
PT	Point target - Alvos Pontuais
RAR	Radares de Abertura Real
RRNN	Referências de Nível
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLC	Single-Look Complex
SM	Stripmap Mode)
SNAP	Sentinel Application Platform
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UTM	Universal Transverse Mercator
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WV	Wave Mode

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	3
1.2. Objetivos e metodologia geral	3
1.3. Organização do trabalho	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1. Movimentos de massa	6
2.1.1. Conceito e instabilidade de taludes.	6
2.1.2. Tipos de movimentos de massa	7
2.1.3. Desastres associados a movimentos de massa no Brasil.....	11
2.1.4. Desastres associados à ruptura de barragens.....	12
2.2.1. Monitoramento de taludes	17
2.2.2. Instrumentação para medidas de deslocamentos em barragens.....	18
2.2.3. Padrão de deslocamentos em barragens de terra.....	23
2.3. Monitoramento de deslocamentos pela técnica de interferometria	1
2.3.1. A Interferometria	1
2.3.2. Sistema SAR	2
2.3.3. Características do imageamento do sistema SAR	6
2.3.4. Interferometria diferencial -InSAR	11
2.3.5. Processamento InSAR.....	14
2.3.6. Determinação dos deslocamentos superficiais.....	21
2.3.7. A aplicação da técnica INSAR na detecção de movimentos superficiais em barragens.	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1. Obtenção das imagens SAR do sensor Sentinel 1.....	24
3.2. Processamento INSAR	27
4. ÁREA DE ESTUDO	31
5. RESULTADOS E ANÁLISES DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA INSAR	38
5.1. Geração dos pares interferométricos.	38
5.2. Resultados da estimativa de coerência	39
5.3. Resultados dos deslocamentos	52
5.4. Análise dos deslocamentos.	60
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	76

RESUMO

O deslizamento de encostas, no contexto dos desastres associados a eventos naturais, figura como uma grande preocupação no espaço urbano nacional. Ações antrópicas também podem desencadear ou intensificar a ocorrência destes desastres. Esta dissertação propõe-se a contribuir para avaliação de técnicas de monitoramento de taludes naturais ou artificiais, sendo esta uma das mais importantes ações para a tomada de decisão diante de uma situação de risco. O presente trabalho aborda o estudo da aplicação da técnica de interferometria por meio de radares de abertura sintética (InSAR) no monitoramento de deslocamento de taludes. A técnica InSAR vem sendo cada vez mais empregada para detecção de movimentos da superfície do terreno ou de estruturas, porém ainda pouco difundida no cenário nacional. Adotou-se como estudo de caso, taludes que compõem uma barragem de terra e enrocamento para armazenamento de água em um empreendimento para geração de energia. Apesar da frequência de desastres associados à ruptura de tais estruturas serem relativamente baixos, os impactos podem ser de grandes proporções. Utilizou-se um conjunto de 33 imagens e dados do sensor radar Sentinel-1 para a medição de deslocamentos na superfície da barragem durante o período compreendido entre julho de 2017 a dezembro de 2019. As imagens foram obtidas do centro de imagens da Agência Espacial Européia e processadas pelo software SNAP. O processamento e análise, usando a técnica, permitiu chegar a valores médios de deslocamentos de ordem milimétrica os quais foram confrontados com medições de topografia. Um importante parâmetro observado foi a distribuição espacial da coerência nos pares de imagens interferométricas, indicando a influência da proximidade da vegetação e da água na qualidade dos dados. Os resultados do trabalho confirmaram a viabilidade do uso do InSAR como técnica complementar para o monitoramento de deslocamentos de taludes, tendo sido possível identificar suas limitações, como por exemplo a decorrelação temporal e a resolução espacial das imagens empregadas.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, interferometria, radar de abertura sintética, movimentos de massa, barragem.

ABSTRACT

Slope landslides, in the context of disasters associated with natural events, are a major concern in the national urban space. Human actions can also trigger or intensify the occurrence of these disasters. This dissertation proposes to contribute to the evaluation of techniques for monitoring natural or artificial slopes, which is one of the most important actions for decision-making in the face of a risk situation. The present work deals with the study of the application of the interferometry technique by means of synthetic aperture radars (InSAR) in the monitoring of slope displacement. The InSAR technique has been increasingly used to detect movements on the surface of the land or structures, but it is still not widespread in the national scenario. It was adopted as a case study, slopes that make up an earth dam and rockfill for water storage in an enterprise for energy generation. Although the frequency of disasters associated with the failure of such structures is relatively low, the impacts can be of great proportions. A set of 33 images and data from the Sentinel-1 radar sensor were used to measure displacements on the surface of the dam during the period from July 2017 to December 2019. The images were obtained from the European Space Agency's image center and processed by SNAP software. The processing and analysis, using the technique, allowed to arrive at average values of millimeter displacements which were confronted with topography measurements. An important parameter observed was the spatial distribution of coherence in pairs of interferometric images, indicating the influence of vegetation and water proximity on data quality. The results of the work confirmed the feasibility of using InSAR as a complementary technique for monitoring slope displacements, and it was possible to identify its limitations, such as temporal decorrelation and spatial resolution of the images used.

Keywords: Remote Sensing, Interferometry, synthetic aperture radar, mass movements

1. INTRODUÇÃO

O movimento de massa é um tipo de evento ao qual estão associados um dos principais tipos de desastres. De acordo com os dados disponíveis pelo Banco de Dados de Eventos de Emergência do Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres da Bélgica (EM-DAT/CRED, 2019), dos 22.200 eventos aos quais estão associados os desastres registrados no mundo entre 1980 e 2011, 17.400 (78,4%) foram tempestades, secas, inundações, deslizamentos de massa, temperaturas extremas e queimadas de floresta. Uma das principais ações que constituem a gestão de risco associado a um determinado evento é o monitoramento das condições que podem indicar a iminência de sua ocorrência. No caso dos deslizamentos de massa, uma das grandezas que podem ser monitoradas com essa finalidade é a magnitude e velocidade de deslocamentos do talude ao longo do tempo. No presente trabalho o termo deslizamentos de massa é utilizado para designar os diferentes tipos de movimentos de massa que consiste no movimento descendente, vertente abaixo, de solo e/ou rocha, sob a ação da gravidade (WICANDER, 2009)

No Brasil, de acordo com o relatório do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB, 2021), das 22.654 barragens existentes registradas, 399 são do tipo terra-enrocamento com usos diversos, correspondendo a cerca de 1,76%. Deste percentual, o órgão classifica 249 barragens, segundo o dano potencial, em grau de risco alto ou médio, o que exige um monitoramento intenso destas estruturas. Nos últimos anos, os métodos de mapeamento de deformações da superfície terrestre avançaram, traduzindo-se no desenvolvimento de novas metodologias de monitoramento de risco geotécnico. No contexto do monitoramento de deslocamentos de taludes, visando a adoção de medidas para evitar a ocorrência da ruptura de taludes ou mitigar os impactos, caso a primeira opção não seja possível, existem técnicas de instrumentação, como a topografia, que acompanha medições de deslocamentos de marcos superficiais, as medições em subsuperfícies e, mais recentemente, o sensoriamento remoto, especificamente a aplicação da interferometria por radar de abertura sintética. Hellwich (1999) cita a potencialidade da técnica de interferometria como elemento do sensoriamento remoto de grande contribuição para sociedade.

O sensoriamento remoto é definido pelo conjunto de técnicas que possibilita a obtenção de informações espaciais sobre alvos na superfície terrestre (objetos, áreas, fenômenos), através do registro da interação da radiação eletromagnética com a superfície,

realizado por sensores (satélites) remotos, e vem sendo utilizado para monitorar movimentos de massa em grandes escalas de mapeamento (LILLESAND E KIEFER, 1994).

A interferometria por radar de abertura sintética também denominada InSAR, IfSAR ou ISAR, é uma técnica de sensoriamento remoto que pode ser definida como o estudo e medição da interação entre ondas emitidas por sensores aerotransportados e as superfícies monitoradas. Como uma técnica de medição, encontra aplicações diversas e em várias áreas da Ciência e Engenharia. Utiliza a emissão de radiação na faixa das micro-ondas e sua interação com os alvos terrestres para, então, identificar e avaliar seus comportamentos, possibilitando inclusive, superar as limitações quanto às condições climáticas e período diurno ou noturno.

A tecnologia InSAR, é atualmente empregada, na maioria dos casos, em estudos de caracterização e detecção de mudanças de uso e ocupação do solo, bem como na mitigação de desastres, devido a possibilidade da implantação de ações preventivas de segurança baseadas na espacialização e geração de modelos de previsão gerados pela técnica.

O primeiro relato de aplicação de InSAR na literatura foi o mapeamento topográfico realizado em 1974 por Graham (GENS; GENDEREN, 1996). Após uma década, as pesquisas foram desenvolvidas possibilitando o monitoramento de processos de erupções, terremotos, enchentes, subsidências, derretimento de geleiras, bem como comportamento de superfícies inclinadas, sendo recentes para estas aplicações, década de 1990 (MASSONNET, FEIGL, 1998). A Missão Topográfica Radar Shuttle (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM), que consistiu no desenvolvimento de um modelo digital de elevação em escala global, contribuiu significativamente para a ampliação dos estudos em InSAR (RABUS et al., 2003). Exemplos recentes de trabalhos nesta área são descritos por Dwivedi et al (2016), que avaliou a aplicação da interferometria SAR para analisar a instabilidade de taludes no reservatório de Tehri na Índia, e Temporim (2017), que demonstrou a aplicação de interferometria SAR para monitoramento de deslocamentos de superfície em mina de ferro a céu aberto, em Carajás, na região amazônica, entre outros trabalhos. Em ambos os casos a aplicação da técnica de interferometria SAR mostrou que é possível o monitoramento de movimentos de massa em grandes áreas.

Conforme verificado em trabalhos desenvolvidos como Nievinski (2004), Antunes (2015), e Patrício (2018), existem ainda questões quanto a aplicabilidade da técnica visto que existem várias limitações, como a resolução espacial e o tempo de revisita dos satélites sobre

a área monitorada, exigindo o desenvolvimento de satélites, radares e softwares com maior tecnologia embarcada.

O presente estudo aborda o uso da técnica InSAR para o monitoramento de taludes com vistas à mitigação de desastres associados a deslizamentos, avaliando sua aplicação em uma área de estudo. A escolha da área tomou por base uma região de relevo composto por taludes que compõem uma barragem de terra e enrocamento para a formação de um reservatório de água com a finalidade de geração de energia elétrica. Essa área foi selecionada pelo fato de ser monitorada através da técnica convencional de topografia, podendo então ser comparada com as medições da técnica InSAR.

1.1. Motivação

Os deslizamentos de massa ocorrem não somente em taludes naturais, mas também em taludes artificiais, entre os quais estão incluídos os de aterro que constituem os taludes de barragens, podendo ter causas diversas, entre elas o aumento da poropressão, erosão interna, galgamento, etc (MASSAD, 2003).

Este trabalho foi motivado pela contribuição que a tecnologia InSAR pode dar para o monitoramento de taludes, em especial, taludes de barragens. Sendo o deslocamento do talude uma das grandezas monitoradas em uma barragem, a interferometria InSAR aparece como uma das possíveis tecnologias a ser empregada.

O tema de pesquisa foi ainda amparado pelo fato da tecnologia InSAR poder contar com disponibilidade gratuita de dados, especificamente de imagens de sensores SAR para geração de informações que se pretende obter no presente trabalho, embora possam apresentar limitações. As imagens obtidas são da missão espacial Sentinel-1, que permitiu, entre outras análises, diversos estudos aplicados a áreas dos desastres geodinâmicos.

1.2. Objetivos e metodologia geral

a) Objetivo geral

Empregar a técnica InSAR para monitoramento dos deslocamentos superficiais de taludes, utilizando imagens da missão espacial Sentinel-1, tendo como estudo de caso uma barragem de terra e enrocamento e avaliar sua aplicabilidade.

A aplicação da técnica será realizada através de dados de imagens de satélite da missão Sentinel-1, do período de julho de 2017 a dezembro de 2019, e do uso do software

gratuito SNAP fornecido pela Agência Espacial Europeia (ESA) para processamento e interpretação das imagens. Os resultados obtidos foram comparados com os de topografia.

Ressalta-se que o presente estudo não tem a finalidade de usar a estimativa de deslocamentos para se fazer uma análise geotécnica do comportamento da estrutura.

b) Objetivos específicos

- Avaliar a capacidade de se detectar e representar, através da técnica InSAR, alterações topográficas em grandes extensões geográficas em escala milimétrica;
- Demonstrar o processamento digital para aquisição de informações sobre os deslocamentos da superfície;
- Analisar o parâmetro da coerência interferométrica, a partir da composição das feições do terreno; e
- Avaliar a acurácia da tecnologia através da comparação com dados de topografia, onde houverem dados disponíveis.

1.3. Organização do trabalho

A dissertação está organizada em seis capítulos e as referências citadas, conforme descrição abaixo:

- Capítulo 1 - apresenta uma introdução ao tema proposto, destacando-se as considerações iniciais do estudo, os objetivos previstos e a própria estrutura da dissertação;
- Capítulo 2 - apresenta uma revisão abrangente sobre movimentos de massa e seus tipos, bem como estabilidade de taludes, desastres associados a movimentos de massa e desastres associados a ruptura de barragem; discorre sobre o monitoramento de taludes e os diferentes tipos de instrumentação; e introduz a Interferometria, bem como o processo da interferometria diferencial, discorrendo ainda sobre suas características e pontos relevantes para obtenção de resultados;
- Capítulo 3 - demonstra os materiais empregados e a metodologia da técnica InSAR, desde a obtenção das imagens de radar até seu processamento;
- Capítulo 4 – traz uma descrição da área estudada, mostrando suas principais características;

- Capítulo 5 – Apresenta e discute os resultados dos valores dos deslocamentos encontrados através do processamento das imagens e a comparação com as medições encontradas com leituras a partir da topografia, bem como analisa efeitos de fatores externos na qualidade dos resultados e uma possível relação com a variação do nível d'água do reservatório ao longo do período estudado;
- Capítulo 6 - Composto pelas conclusões do trabalho e propostas de futuras pesquisas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Movimentos de massa

2.1.1. Conceito e instabilidade de taludes.

Na bibliografia internacional os movimentos de solo e rocha são conhecidos e classificados como landslides, landslips, mass movements, slope movements ou mass wasting pelos profissionais que abordam o tema. (SILVEIRA, 2008)

Em síntese, Nummer (2003) define movimento de massa como qualquer deslocamento de material terroso ou rochoso, independentemente de sua forma, velocidade ou processo que o gerou. Para Varnes (1978) são todos os movimentos gravitacionais que promovem a movimentação de partículas ou partes do regolito (massas) pela encosta abaixo.

A demanda por espaços em área urbana vem aumentando a cada ano, habitações, vias e outros elementos antropizados vem ocupando estes espaços localizados nas proximidades ou sobre a própria encosta, aumentando o risco associado a movimentações de massa, expondo os elementos aos desastres de grandes dimensões (AMARAL, 1997). Nesse sentido, taludes naturais ou artificiais necessitam do constante monitoramento para evitar ou minimizar os danos associados à sua ruptura.

Qualquer superfície inclinada composta por solo ou rocha é denominada talude, sendo formado pelas seguintes partes: pé, talude, topo ou crista e superfície de ruptura, como pode ser observado na Figura 1.

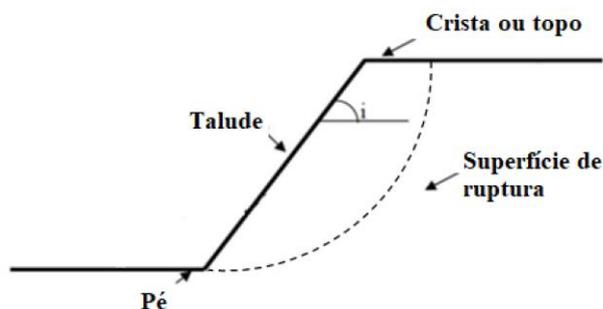


Figura 1 - Composição de um talude
Fonte: Autor, 2019

Os taludes podem ser do tipo natural, também denominado encosta, ou construído pelo homem, como cortes e aterros. Os taludes em solo podem ser formados por dois tipos de

solos: solo residual – originado por intemperismo e permanecendo no local onde foram gerados; ou solo coluvionar ou tálus – gerado a partir do transporte de solos pela ação da gravidade (GERSCOVICH, 2016; MASSAD, 2010).

As causas dos deslizamentos podem ser classificadas em: externa, resultante do aumento das tensões de cisalhamento ao longo da superfície de ruptura até o momento de sua ocorrência, como a mudança da geometria do talude (inclinação e/ou altura); aumento da carga atuante (por sobrecargas na superfície, por exemplo); atividades sísmicas, cortes no pé do talude; interna, resultante da diminuição da resistência do material, como intemperismo/decomposição; erosão interna; aumento da poropressão; decréscimo da coesão; e intermediária, ações que podem ocorrer no maciço ou fundação devido à elevação do lençol freático ou do nível d’água do reservatório no caso de barragens. (TERZAGHI,1952)

2.1.2. Tipos de movimentos de massa

O Brasil é considerado muito suscetível aos movimentos de massa devido às condições climáticas marcadas por verões de chuvas intensas em regiões de grandes maciços montanhosos (GUIMARÃES, 2008).

Sepúlveda (2015) alerta para o fato da existência em proporções catastróficas de movimentos de massa em centros urbanos, onde atividades humanas como cortes em talude, aterros, depósitos de lixo, modificações na drenagem, desmatamentos, entre outras, aumentam a suscetibilidade ao deslizamento em encostas.

Varnes (1978) classifica os deslizamentos usando critérios que enfatiza o tipo de movimento e o tipo de material (solo ou rocha), Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação simplificada dos movimentos em encostas.

Tipo do movimento	Tipo do material		
	Rocha	Solos	
		Predominantemente	Predominantemente
Queda	Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de terra
Tombamento	Tombamento de rocha	Tombamento de detritos	Tombamento de terra
Escorregamento ou	Escorregamento de	Escorregamento de	Escorregamento de
Espalhamento	Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos	Espalhamento de terra
Corrida	Corrida de rocha	Corrida de detritos	Corrida de terra

Fonte: Varnes, 1978

Dentre os tipos de movimento de massa listados, Higland e Bobrowsky (2008) ainda citam a subsidência e colapsos como tipos de movimentos ocorridos nos solos, que nestes casos não ocorrem necessariamente em taludes. A seguir são apresentadas as definições existentes:

a) Quedas

Para Varnes (1978) quedas são movimentos em queda livre de fragmentos rochosos (de volumes variáveis) que se desprendem de taludes íngremes, conforme representado na Figura 2. A Figura 3 representa o tombamento, que é um movimento de rotação frontal de bloco rochoso para fora do talude. Os Rolamentos, representado pela Figura 4, são movimentos que envolvem blocos rochosos que se deslocam ao longo de um plano inclinado (GERSCOVICH, 2012).

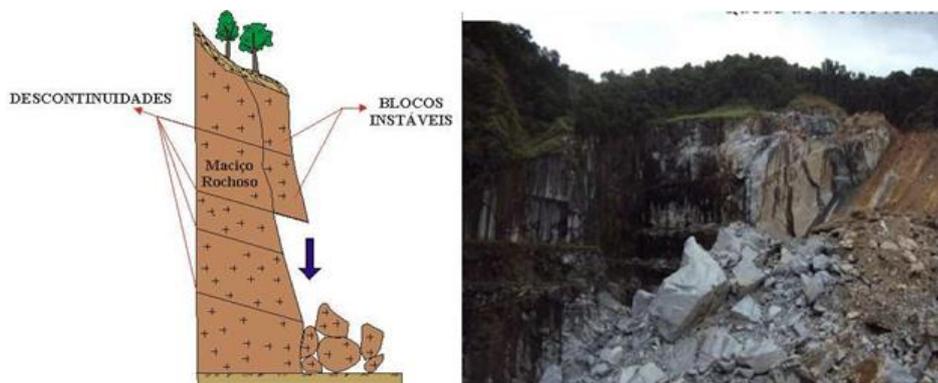


Figura 2 - Representação da queda e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência
Fonte: CEMADEN, 2019



Figura 3 – Representação do tombamento e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência.
Fonte: CEMADEN, 2019

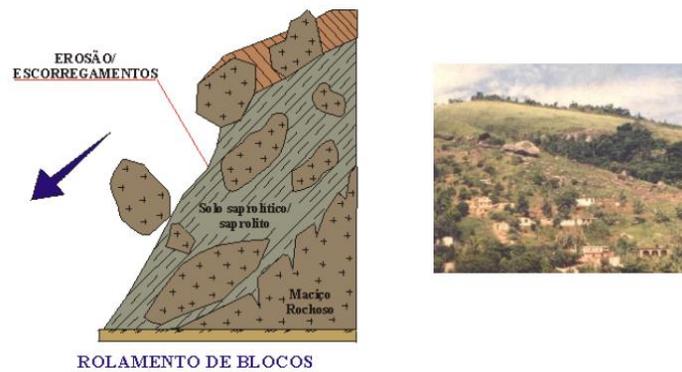


Figura 4 - Representação do rolamento e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência.
 Fonte: CEMADEN, 2019

b) Deslizamentos ou Escorregamentos

São movimentos de solo e rocha que ocorrem ao longo de uma superfície de ruptura bem definida (Figura 5). Quando a superfície de ruptura é curvada no sentido superior (em forma de colher) com movimento rotatório em materiais superficiais homogêneos, o movimento de massa é classificado como deslizamento rotacional, já quando o escorregamento ocorre em uma superfície relativamente plana e associada a solos mais rasos, é classificado como deslizamentos translacionais (VARNES, 1978).

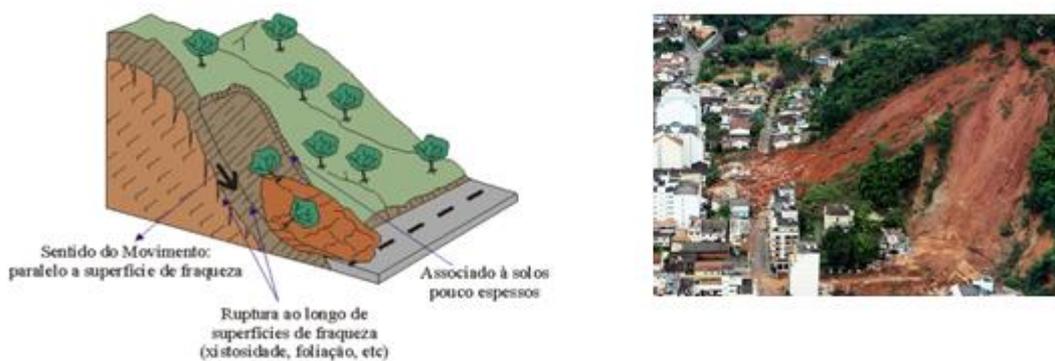


Figura 5 - Representação do deslizamento e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência
 Fonte: CEMADEN, 2019

c) Rastejos ou fluimentos,

São movimentos bastante lentos que ocorrem nas camadas superiores do maciço, diferem dos escorregamentos, pois o limiar que separa a porção que se desloca e a parte

remanescente do maciço, não é tão evidente. Terzaghi (1950) divide ainda os rastejos em contínuos e sazonais. Estes ocorrem numa camada superficial de pequena espessura onde o solo sofre as influências das variações frequentes da umidade e temperatura, já os contínuos atingem profundidades maiores e diferem dos escorregamentos pela baixa velocidade de deslocamento e por não apresentar uma superfície de deslizamento claramente definida. O comportamento do solo no rastejo contínuo pode ser comparado ao de um corpo viscoso; enquanto o escorregamento, ao de um corpo plástico.

d) Fluxos de Lama e Detritos

Também chamados corridas de massa, 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 escoam encosta abaixo em forma de um material viscoso composto por lama e detritos rochosos (Figura 6).



Figura 6 - Representação do fluxo de lama e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência.
Fonte: CEMADEN, 2019

Esse tipo de movimento de massa se caracteriza por ter extenso raio de ação e alto poder destrutivo (CHRISTOFOLETTI, 1980; AUGUSTO FILHO, 2001)

e) Subsidência e Colapsos

São movimentos de massa caracterizados por afundamento rápido ou gradual do terreno devido ao colapso de cavidades, redução da porosidade do solo ou deformação de material argiloso, ilustrado pela Figura 7. (HIGHLAND, 2008; CASTRO, 2008)

São formadas cavidades em materiais carsticos por percolação de água carreando material das rochas carbonáticas ou calcáreas, além do piping e saturação de materiais colapsíveis porosos por dissolução da cimentação que mantém os poros.

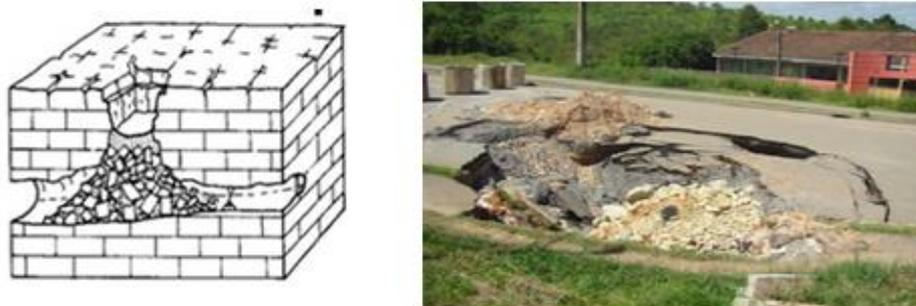


Figura 7 - Representação da subsidência e uma fotografia evidenciando a sua ocorrência.
Fonte: CEMADEN, 2019

A subsidência dos solos motivada por extração mineira, construções subterrâneas, atividade geotermal, ou outras atividades antropogênicas têm sido descritas em vários trabalhos como por exemplo, Crosetto et al. (2003), que demonstrou o monitoramento de subsidência urbana usando interferometria SAR na Catalonia, no nordeste da Espanha

2.1.3. Desastres associados a movimentos de massa no Brasil

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2019), somente entre 2013 e 2019 foram registrados 555 movimentos de massa com mais de 750.000 pessoas afetadas, sendo contabilizados danos financeiros referentes a unidades habitacionais de, aproximadamente, R\$385.000.000,00 e a instalações públicas e infraestrutura, R\$600.000.000,00. A Figura 8 ilustra os registros de desastres associados a movimentos de massa no Brasil no período de 1991 a 2012. Estes números podem estar subestimados, posto que existem desastres equivocadamente registrados como associados exclusivamente a outros fenômenos, como o caso do evento de janeiro de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro, que fora classificado como enxurrada e não movimentos de massa.

Deve-se destacar que os casos de desastres deflagrados pela ruptura de taludes de barragens não são classificados por órgãos oficiais de gestão de riscos como associados a movimentos de massa, sendo considerados na categoria de desastre tecnológico, relacionado a obras civis, estando no subgrupo de “rompimento/colapso de barragens”.

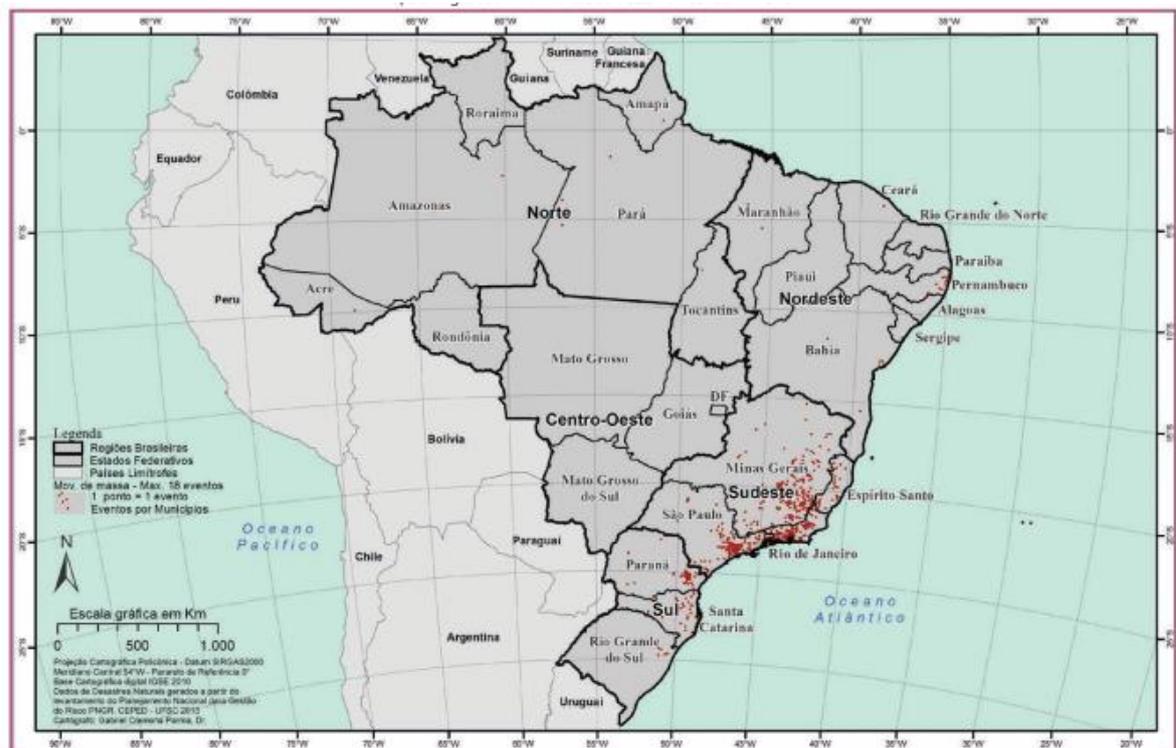


Figura 8 - Registros de movimento de massa no Brasil de 1991 a 2012.
 Fonte: CEPED (2012)

2.1.4. Desastres associados à ruptura de barragens.

As barragens são estruturas que têm a função de reter e controlar o fluxo de água, normalmente usadas para abastecimento de água para consumo humano e de animais, geração de energia elétrica, irrigação, recreação, paisagismo, controle da qualidade da água e de enchentes, garantia mínima de vazão a jusante, navegação, aquicultura, e contenção de rejeitos (CBDB, 2019).

Dentre os tipos de barragens, quanto aos materiais, os mais usados no Brasil são listadas abaixo (CBDB, 2019):

- Barragem de terra: é a mais usada no Brasil, caracteriza-se por serem construídas em vales muito largos e ombreiras suaves. Pode ser de terra homogênea, constituída de apenas um material, ou de terra zoneada, aquela que, por falta de área de empréstimo com material argiloso suficiente para a construção de todo o aterro, prioriza o núcleo argiloso, no centro. Esse tipo de barragem permite fundações de qualquer tipo de solo ou rocha.

- Barragem de Enrocamento: Consiste em um maciço formado por fragmentos de rocha compactados em camadas cujo peso e imbricação cria a estabilidade do aterro. Para atender ao requisito de vedação, essa barragem apresenta núcleo argiloso, face de concreto ou geomembrana ou núcleo de concreto asfáltico.
- Barragem de Concreto: Existem 5 tipos de barragem de concreto, entre eles estão:
 - i. Gravidade: barragens de concreto maciço e com pouca armação, muito rara no Brasil.
 - ii. Gravidade Aliviada: essa barragem possui estrutura mais leve, com objetivo de imprimir menos pressão na fundação ou economizar projeto. Oferece economia no volume de concreto e diminuição das áreas sobre as quais pode agir a subpressão e a pressão intersticial.
 - iii. Em contraforte: mais leve que a de gravidade aliviada, essa barragem concentra em uma pequena área da fundação os esforços causados pela pressão hidrostática.
 - iv. De concreto compactado: é um tipo de barragem de gravidade diferido pelo método construtivo que utiliza tratores de esteira para o espalhamento do concreto que é posteriormente compactado com rolos vibratórios.
 - v. Abóboda: são aquelas cujas curvaturas ocorrem em duplo sentido. Uma parte da pressão hidráulica é transmitida às ombreiras por estes arcos.
- Barragem Mista: Constituída por diferentes materiais, normalmente feita terra e enrocamento, enrocamento e concreto ou concreto e terra.

A Figura 9 demonstra os elementos que constituem uma barragem de terra e sua respectiva seção.

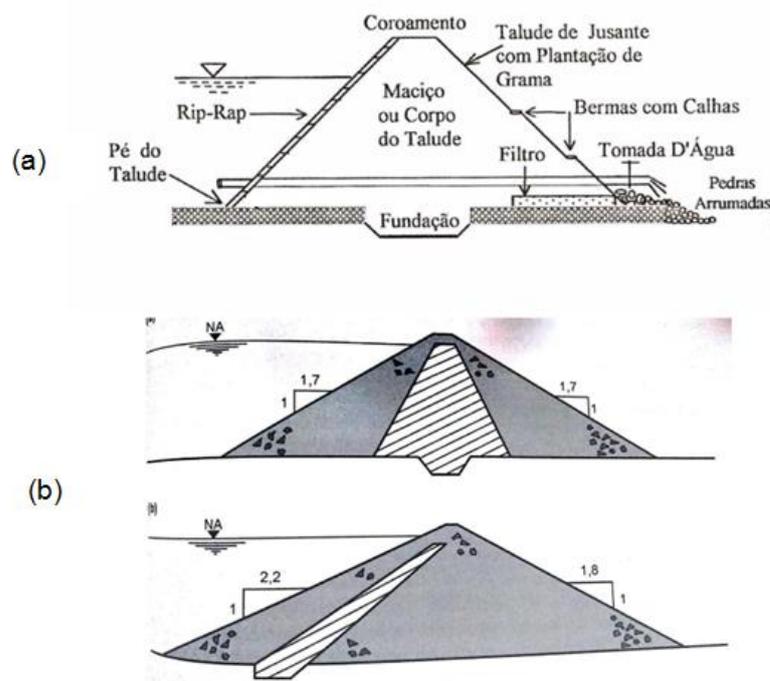


Figura 9 – Desenhos esquemáticos dos elementos que constituem uma barragem de terra (a) e de seções transversais de barragens de terra e enrocamento (b).

Fonte: Carvalho, 1997.

Quanto ao histórico de ruptura de barragens, o Boletim 99 da International Commission on Large Dams (ICOLD, 1995 apud SILVA, 2012) relata que, para as barragens construídas antes de 1950, a percentagem de ruptura de grandes barragens é de 2,2% e de cerca de 0,5% para as construídas após esta data. A maior parte das rupturas, cerca de 70%, ocorreu em barragens nos seus primeiros 10 anos de operação e, mais especialmente, no primeiro ano após o comissionamento.

Em barragens de concreto, os problemas de fundação são a maior causa de ruptura. No caso das barragens de terra, a causa mais comum de ruptura é a percolação e erosão interna do corpo da barragem com 38% de incidência, seguido pelo galgamento com 35%, e erosão interna da fundação com 21%, além de outros fatores com 6%. (FERREIRA, 2015)

No Brasil ocorreram diversos casos de acidentes em barragens, registrados desde 1957 envolvendo prejuízos econômicos e, em caso de ruptura, danos à vida humana, materiais e ao meio ambiente. O Ministério da Integração Nacional (2019), registrou 69 rompimentos de barragens com mais de 415.000 pessoas afetadas no período de 2013 e 2019 e prejuízos contabilizados acima de R\$255.000.000,00. Dentre as principais causas de rompimento de barragem, Pedrosa (2017) cita problemas de fundação, capacidade inadequada dos

vertedouros, instabilidade dos taludes, falta de controle de erosões, deficiência no controle e inspeção pós-operação e falta de procedimentos de segurança ao longo da vida útil da estrutura. Somente com um grande investimento em gestão da segurança, as barragens poderão atender as necessidades da sociedade, sem representarem uma fonte permanente de riscos (MENESCAL, 2009).

Como exemplos mais recentes, tem-se: em 2014, o rompimento da barragem de Itabirito (MG), em 2015, o colapso da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana (MG), também em 2015, a ruptura da barragem de Brumadinho (MG) e a ruptura da barragem do Quati, em Pedro Alexandre (BA), ambas em 2019. (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2019)

Tais acidentes devem ser evitados não só através de projetos adequados e de uma correta operação dessas estruturas, mas também com o emprego de um monitoramento eficiente (MENESCAL, 2009). A importância da operação e manutenção das barragens devem ser consideradas desde sua concepção.

“[...] são muito importantes os efeitos de monitoramento e verificações de segurança periódicas, segundo esta visão. Se estas atividades forem realizadas de maneira efetiva, ações corretivas serão tomadas de tempos em tempos...”(ICOLD,2003)

Mascarenhas (1990) afirma que a ruptura de uma barragem é um fenômeno que pode ser induzido por causas naturais ou provocado pela ação humana, podendo ser causado pela associação destes fatores. Uma descrição resumida das causas prováveis nesses tipos de acidentes é apresentada a seguir.

- Galgamento (overtopping)

O galgamento resulta da incapacidade do vertedouro da barragem extravasar totalmente a cheia afluente ao reservatório. Esse comportamento pressupõe a passagem de uma parcela da vazão afluente sobre a barragem, em partes não projetadas para verter água, desencadeando um processo de ruptura do maciço da barragem. (MASCARENHAS, 1990)

- Erosão interna (piping)

A erosão interna é um processo de formação de um tubo de escoamento preferencial, denominado entubamento (piping), que pode ocorrer em barragens de terra. A falha por piping é um fenômeno que ocorre por erosão regressiva, onde há formação de um tubo, originado do carreamento de partículas, de jusante para montante no maciço de terra compactada em uma barragem, podendo ocorrer também em seu núcleo. (LADEIRA, 2007)

- Falhas nas fundações

O terreno sobre o qual a barragem está e a ligação da barragem ao terreno podem deslizar sob o efeito das acomodações geológicas que resultam do enchimento do reservatório ou da saturação do material da fundação por infiltração. Outra ameaça às fundações são as cheias extraordinárias que causam o galgamento, quando a água que passa sobre a barragem provoca a erosão da base da estrutura. (COLLISCHONN, 1997)

- Efeitos sísmicos e terremotos

Apesar dos fenômenos sísmicos serem até hoje objeto de pesquisas sobre o assunto, sabe-se que os terremotos são compostos de distribuições harmônicas sobre uma vasta faixa de frequência. Percebe-se que a análise detalhada da influência desses fenômenos sobre as estruturas de uma barragem ainda possui um grande campo associado a estudos e pesquisas. (MASCARENHAS, 1990)

Uma barragem é uma obra de engenharia que exige para a sua segurança critérios bastantes cuidadosos durante as fases de projeto, construção e operação, devido à complexidade de funcionamento e risco potencial da estrutura. (ANDRIOLO, 2008)

Nesta esteira, quanto a periodicidade das inspeções de segurança, existem recomendações indicando que deve ser definida de acordo com a Categoria de Risco e Dano Potencial Associado (ANA, 2016), podendo ser ajustada em face das exigências da entidade fiscalizadora e dos recursos disponíveis (Tabela 2). Deve-se ressaltar que, na área de segurança de barragens, risco, segundo a Resolução 742 de 2011 (BRASIL, 2011), consiste na probabilidade da ocorrência de um acidente, estando relacionado aos aspectos da própria barragem (aspectos de projeto, integridade da estrutura, estado de conservação, operação e manutenção e atendimento ao Plano de Segurança).

Tabela 2 - Periodicidade de inspeções de segurança

DANO POTENCIAL ASSOCIADO	CATEGORIA DE RISCO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	SEMESTRAL	SEMESTRAL	SEMESTRAL
MEDIO	SEMESTRAL	SEMESTRAL	ANUAL
BAIXO	ANUAL	ANUAL	BIANUAL

Fonte: ANA, 2016

2.2. Monitoramento de deslocamento em taludes

2.2.1. Monitoramento de taludes

O monitoramento de um talude consiste em fazer inspeções visuais e/ou medições com a finalidade de aferir e acompanhar a evolução de grandezas relacionadas a sua condição de estabilidade. Visam-se avaliar premissas de projeto e o nível de segurança do talude ao longo do tempo. Os resultados do monitoramento são considerados para possíveis medidas preventivas em um sistema de alerta e alarme.

De uma forma geral, os principais parâmetros que devem ser observados ou medidos no monitoramento de taludes são trincas e abatimentos do terreno, deslocamentos na superfície e em profundidade e as condições de fluxo e poropressões (GEORIO, 2000; Briaud, 2013). Mikkelsen (1996), afirma que existem situações típicas para as quais vários instrumentos podem ser empregados e lista alguns pontos gerais importantes:

- Determinação da profundidade e da forma da massa em um escorregamento já desenvolvido para utilização em retroanálises;
- Determinação dos movimentos laterais verticais e laterais absolutos dentro de uma massa escorregada;
- Determinação da taxa de deslocamento (velocidades) de forma a servir como aviso de perigo iminente;
- Monitoramento da atividade de talude escavados ou encostas com estabilidade marginal e identificação dos efeitos de construção ou de chuvas;
- Monitoramento dos níveis de água subterrâneos, ou das poro-pressões, normalmente associados com movimentações; e

- Estabelecimento de um sistema de alerta através de medidas remotas que possam alertar a população de possíveis perigos;
- Monitoramento e avaliação da efetividade de medidas de controle adotadas.

2.2.2. Instrumentação para medidas de deslocamentos em barragens

Faz-se necessário o estabelecimento de um plano de instrumentação de barragens que se inicia pela definição de pontos considerados importantes, aqueles que receberão instrumentação mais completa, seja na fundação ou na estrutura. Uma vez mapeados os pontos, são definidos os instrumentos, e deve ser adotado um critério baseado nas medições/observações das principais grandezas. As principais grandezas normalmente monitoradas numa barragem são: piezometria, pressão total, deslocamentos superficiais e em profundidade e vazão. Nas barragens de terra e enrocamento, os taludes são monitorados considerando medidores internos ou superficiais de deslocamentos verticais e horizontais (OLIVEIRA e SAYÃO, 2004).

Por meio do monitoramento, os dados obtidos em campo pela instrumentação tornam possíveis ações preventivas e corretivas nos taludes que compõem a estrutura de barragens, mediante um adequado processamento e interpretação dessas leituras, envolvendo frequência e abrangência das mesmas. Dentre os instrumentos existentes, os mais empregados em barragens de terra e enrocamento, segundo Fusaro (2007), são:

a) Tubo medidor de nível d'água

É constituído por um tubo de PVC perfurado, introduzido num furo de sondagem feito no maciço. O tubo perfurado é envolto por manta geotêxtil ou tela, e inserido no furo cujo espaço anelar é preenchido com areia para evitar o carreamento de solo. Acimado trecho perfurado é feito um selo de solo-cimento para impedir a entrada de água superficial e/ou pluvial. Verifica a posição da linha freática.

b) Medidor de vazão

Vertedouro de parede delgada que permite através de fórmulas hidráulicas, calcular a vazão do fluxo vertente. O perfil vertente pode ser triangular, quadrado ou trapezoidal, de acordo como volume a ser medido

c) Piezômetro Casagrande modificado de tubo aberto

São constituídos por um tubo de PVC inserido em um furo de sondagem, em cuja extremidade inferior é instalado um elemento poroso (bulbo), capaz de medir pressões neutras em maciços de terra, taludes e fundações, subpressões nas fundações de estruturas de concreto.

d) Piezômetro Casagrande modificado de tubo fechado

Possuem as mesmas características do piezômetro de tubo aberto. A diferença é a existência de pressão de água na saída do tubo, a leitura só sendo possível através do emprego de manômetro ou de mangueiras de plástico graduadas instaladas na boca do tubo.

e) Piezômetro elétrico

O piezômetro possui um diafragma de aço inoxidável onde são fixados extensômetros elétricos de resistência, dispostos em circuito de ponte completa. Quando submetido a uma pressão externa o diafragma flete, provocando deformações nos extensômetros, variando assim a resistência dos mesmos, dando uma saída elétrica proporcional à pressão aplicada. Possui ótimo tempo de resposta, sendo muito utilizado no período de construção de barragens

f) Piezômetro hidráulico

Consiste de um corpo metálico ou plástico ao qual está solidária uma pedra porosa, conectado ao painel de leitura através de dois tubos flexíveis. Seu funcionamento baseia-se no equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível. De um lado atua a água cuja pressão se deseja medir, do outro atua água desaerada, similarmente ao princípio de funcionamento do piezômetro pneumático. Estando saturados com água o painel e os tubos, a leitura é efetuada abrindo, um por vez, os registros que conectam cada um dos dois tubos provenientes do piezômetro no manômetro de leitura, e aguardando a estabilização do ponteiro.

g) Célula de pressão total

É constituída de uma almofada de aço inoxidável, circular ou retangular, totalmente preenchida com óleo desaerado, acoplada a um transdutor de pressão pneumático, elétrico ou de corda vibrante, que permite medir a pressão do óleo no interior da célula, que é igual à tensão total induzida pelo solo adjacente. Mede Tensões totais em obras de maciços de terra, fundações, muros de arrimo, etc.

h) Inclinômetro de recalque

Consiste de um conjunto de segmentos de tubos de alumínio ou PVC, confeccionados especialmente para esta finalidade, montados através de luvas telescópicas e rebites. O deslocamento vertical do revestimento cisalha os rebites, permitindo o movimento dos segmentos. É medida a posição de cada tubo utilizando trena com sonda pescadora, obtendo-se o perfil de recalque ao longo da altura do maciço. Mede deslocamentos verticais do conjunto fundação e maciço de terra.

i) Extensômetro de hastes

O instrumento consiste de um conjunto de hastes metálicas instaladas dentro de um furo de sondagem. As hastes são rígidas e protegidas por mangueira plástica ao longo de seu comprimento. As extremidades inferiores das hastes são chumbadas na rocha em cotas distintas e as extremidades superiores dispostas no cabeçote de leituras. Sua função é determinar qualitativa e quantitativamente os deslocamentos dos diversos pacotes de um maciço rochoso, sendo também aplicado para mensuração da expansão do concreto com problema de reatividade álcali-agregado.

j) Marcos superficiais

Estes instrumentos são comumente utilizados para monitorar os deslocamentos superficiais verticais e horizontais do maciço (Figura 10). São empregados níveis geométricos ou estações totais para realização dos levantamentos topográficos (HUALLANCA, 2004). A Figura 11 demonstra o nivelamento geométrico e a diferença de cota (ΔH) entre marcos superficiais representados pelos pontos A e B. As medidas são efetuadas a partir de uma referência de nível, localizada em terreno estável, não sujeito a movimentações de quaisquer naturezas. No estudo em tela, com

foco nos deslocamentos superficiais, estes dispositivos serão adotados para comparar os resultados dos deslocamentos superficiais verticais em relação a aplicação da técnica INSAR.



Figura 10 – Imagens de marcos superficiais
Fonte: Autor, 2019

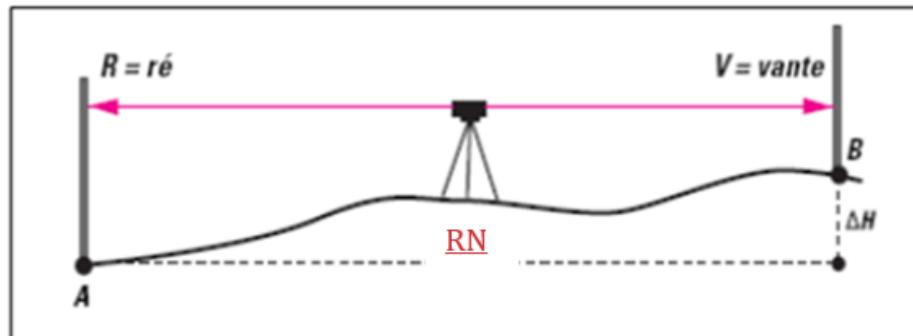


Figura 11 - Nivelamento geométrico e a diferença de cota entre marcos superficiais situados nos pontos A e B.
Fonte: Autor, 2019

Os instrumentos de monitoramento têm suas incertezas relacionadas a: resolução, sensibilidade, linearidade, histerese, ruído, acurácia e precisão (DUNNICLIFF, 1988).

- Resolução é a menor divisão de escala que tenha estabilidade de leitura; é comum um indicador digital fornecer 4 dígitos após a vírgula, mas somente 3 serem estáveis.

- Sensibilidade: é o sinal de entrada menor que resulta em um sinal de saída detectável. É a capacidade de resposta do sistema de medição nas mudanças na característica medida.
- Linearidade: está relacionado ao quão exatas são as suas medições através da amplitude esperada das medições.
- Histerese: A histerese é a diferença máxima da indicação do instrumento levando em consideração a análise do ponto medido na subida (crescente) e do mesmo ponto medido na descida (decrecente), ou seja, a diferença do resultado dessas duas medidas (entre subida e descida).
- Ruídos: são interferências externas à medição causadas por vibrações, efeitos eletromagnéticos, oscilação da voltagem de excitação e variação de temperatura.
- Acurácia: mede a proximidade da medida obtida ao valor verdadeiro; geralmente calibrado em laboratório.
- Precisão: é a proximidade de cada uma de várias medidas à média aritmética destas medidas (repetibilidade).
- Erro: é definido como o desvio entre o valor medido e o valor real ou o valor admitido como correto (erro grosseiro). O erro relativo é o quociente entre o erro absoluto e o valor real da leitura. Podem ser:
 - i. Erros grosseiros: geralmente causados por descuido, fadiga ou inexperiência do operador;
 - ii. Erros sistemáticos: causados por calibração imprópria, alterações da calibração com o tempo, histerese e não-linearidade;
 - iii. Erros de conformidade: causados pela seleção errada dos procedimentos de instalação ou pelas limitações no projeto do instrumento;
 - iv. Erros ambientais: causados pelos efeitos de calor, umidade, vibrações, pressão, etc sobre o instrumento de medida;
 - v. Erros observacionais: causados pela atuação de diferentes observadores (equipes de medições) usando diferentes técnicas observacionais;
 - vi. Erros de amostragem: causados pela instalação do instrumento em local inadequado e pela variabilidade do material sendo instrumentado;

- vii. Erros acidentais: erros imponderáveis, essencialmente variáveis e não susceptíveis de prevenção.

2.2.3. Padrão de deslocamentos em barragens de terra.

A partir do adequado monitoramento e tratamento dos dados adquiridos no monitoramento é possível ter uma previsão do comportamento dos taludes e dos possíveis mecanismos de movimentação, para identificar locais críticos, tensões ou poropressões em barragens. As figuras 12, 13 e 14 apresentam padrões de deformações verticais e horizontais de barragens de terra nas fases ao final da construção e pós construção, sendo que as magnitudes dos deslocamentos horizontais são relativamente pequenos em relação aos deslocamentos verticais (USBR, 2011).

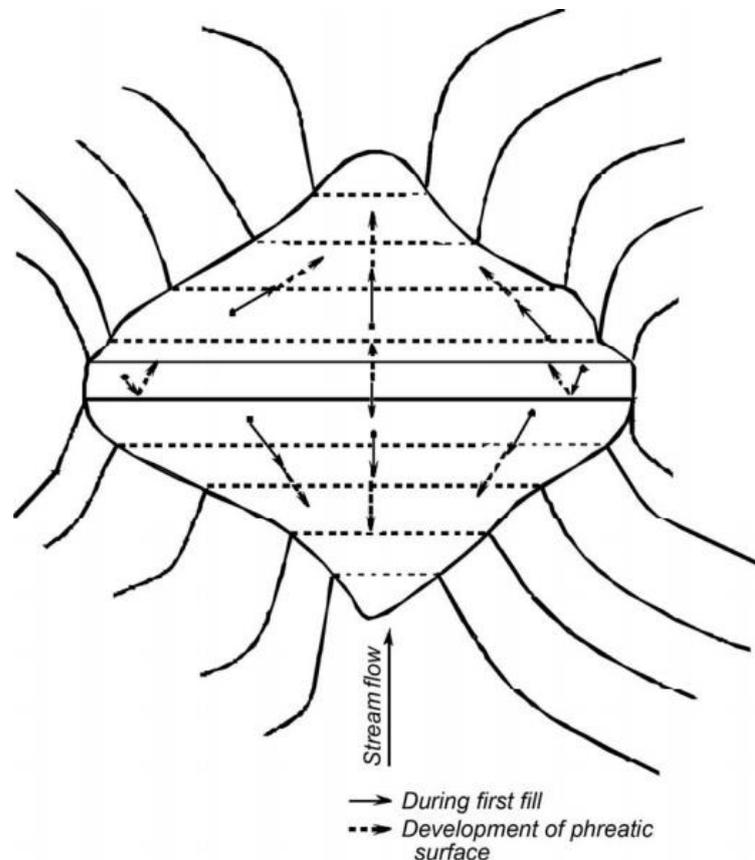


Figura 12 - Padrão geral de deslocamentos horizontal dos taludes de uma barragem de terra
Fonte: USBR, 2011

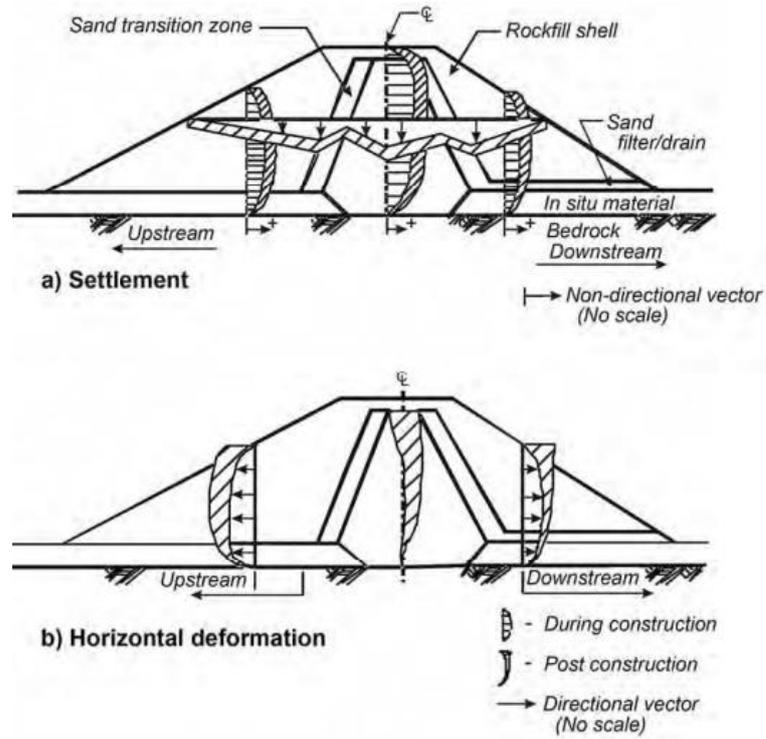


Figura 13 - Padrão geral de deslocamentos ao longo da seção de máxima altura de uma barragem

Fonte: USBR, 2011

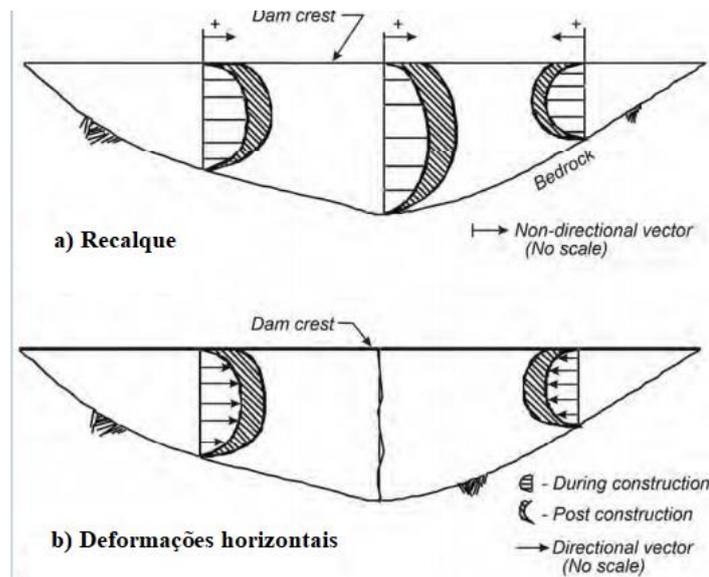


Figura 14 - Padrão geral de deslocamentos ao longo do eixo de uma barragem de terra.

Fonte: USBR, 2011

Para definição de limites para deslocamentos superficiais em estruturas de barragens, Hunter (2003) afirma a existência de métodos preditivos, empíricos e numéricos, voltados

para estudos sobre deslocamentos. A partir de estudos sobre uma coletânea de dados de barragens, este autor sintetiza, conforme apresentado na Tabela 3, o comportamento esperado durante a construção, no enchimento do reservatório e no pós-construção destas estruturas, e apresenta as deformações totais esperadas da superfície no período pós-construção, relacionando o recalque à altura da barragem em função do tempo da construção.

Tabela 3 - Faixa típica de deslocamentos verticais após o término da construção

LARGURA DO NÚCLEO	PROPRIEDADES DO NÚCLEO		CASOS	RECALQUE DA CRISTA (% DA ALTURA DA BARRAGEM)**			
	CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM SUCS*	TEOR DE UMIDADE		3 ANOS	10 ANOS	20 A 25 ANOS	
Delgada a média	Argilas de baixa plasticidade/argila de alta plasticidade	CL/CH	Seco	9	0,05 - 0,55	0,10 - 0,65	0,20 - 0,95
			Úmido	11	0,04 - 0,75	0,08 - 0,95	0,20 - 1,10
	Areias argilosas / cascalhos argiloso	SC/GC	Seco	5	0,10 - 0,25	0,10 - 0,40	< 0,50
			Úmido	18	0,15 - 0,80	0,20 - 1,10	< 1,10
Delgada a Ampla	Areias siltosas / Cascalhos siltosos	SM/GM	Seco	16	0,06 - 0,30	0,10 - 0,65	< 0,50 - 0,70
Ampla	Argilas de baixa plasticidade/argila de alta plasticidade	CL/CH	Ambos	12	0,02 - 0,75	0,10 - 1,00	0,50 - 1,00
	Areias argilosas / cascalhos argiloso	SC/GC	Ambos	5	0,05 - 0,20	0,10 - 0,35	0,10 - 0,45
Muito Ampla	Todos		Ambos	18	0 - 0,60	0 - 0,80	0,05 - 0,76

*Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

**O tempo inicial é estabelecido ao final da construção do aterro.

Fonte: Hunter 2003 (Adaptado).

2.3. Monitoramento de deslocamentos pela técnica de interferometria

2.3.1. A Interferometria

Interferometria é uma técnica com aplicações diversas em várias áreas da Ciência e Engenharia, pode ser definida como uma técnica de obtenção de informações a partir da sobreposição de ondas. Uma vez que a interferência é um fenômeno geral entre ondas, a interferometria é aplicável a um largo espectro de campos. (BUNCH, 2004)

No campo da Topografia, a interferometria é aplicada atualmente para realizar levantamentos topográficos de precisão utilizando satélites artificiais de navegação, por exemplo o GPS (Global Positioning System), também é empregada para determinar a orientação e escala da Terra utilizando sinais de rádio de astros distantes, permitindo com isso a definição, implantação e manutenção de sistemas de referência geodésicos modernos.

No campo do sensoriamento remoto, a interferometria é utilizada para o imageamento tridimensional da superfície da Terra por meio de Radares de Abertura Sintética (SAR). Esta técnica envolve a combinação de duas ou mais imagens de radar do mesmo local permitindo obter medições precisas, possibilitando desta forma a extração de informações altimétricas da área imageada.

O radar, em inglês denominado por Radio Detection And Ranging, é essencialmente um sistema de medição de distâncias que foi introduzido por Nikola Tesla em 1914 nos Estados Unidos (GUARNIERI, 2010). É considerado um método de detecção remoto ativo, pois tem a sua própria fonte de emissão de radiação, ou seja, é capaz de emitir e ainda receber ondas eletromagnéticas.

Uma onda (Figura 15) é caracterizada por: amplitude, frequência e fase. A amplitude é a medida da altura da onda para um valor positivo e um valor negativo. A amplitude é igual a diferença entre o valor da onda num determinado instante de tempo e o ponto onde se anula ou zero. A partir de um valor inicial, a onda cresce atinge a amplitude máxima, decresce, se anula, atinge sua amplitude negativa mínima e volta a crescer até se anular novamente. Essa seqüência compõe um ciclo. A frequência é o número de ciclos por segundo.

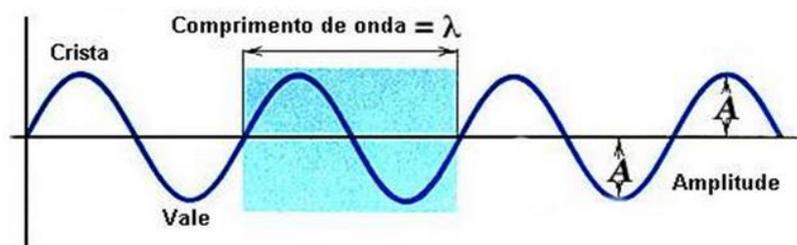


Figura 15 - Elementos de ondas.
 Fonte: Ferraro et all, 2001

A fase é uma uma grandeza cujos valores estão contidos nos intervalos $[0,2\pi]$ e que descreve a direção de movimento e a posição ou o deslocamento de um ponto de vibração no senóide em relação a uma posição de referência (VAN DER SANDEN, 1997). A fase é portanto a propriedade de um fenômeno periódico, no caso o fenômeno ondulatório, e diz respeito à propagação da onda num determinado instante de tempo. Duas ondas estão em diferença de fase quando num instante de tempo qualquer tomado como referência, os valores angulares das duas são diferentes (Figura 16).

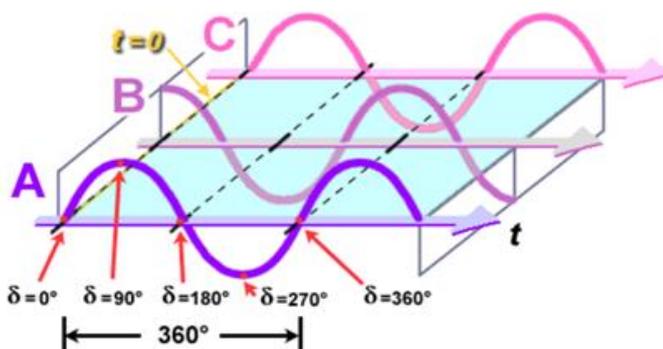


Figura 16 - Representação esquemática da fase em ondas senoidais num intervalo de tempo $t=0$. As ondas A e B estão 90° fora de fase enquanto A e C estão em fase.
 Fonte: Gaboardi, 2002.

2.3.2. Sistema SAR

Os Radares de Abertura Sintética (SAR -Synthetic Aperture Radar) referem-se a um sistema capaz de emitir uma onda eletromagnética para o imageamento de superfícies (SKOLNIK, 1990). São instalados em plataformas, aéreas ou orbitais, que obedecem a uma trajetória acima de uma superfície de referência da Terra (normalmente para essa superfície é

adotado um elipsóide ou o geóide). Figurando, adicionalmente como alternativa embora limitados a regiões menores de monitoramento, existem os radares instalados em plataformas terrestres. Estes desempenham o mesmo princípio quanto às propriedades da radiação eletromagnética dos sistemas embarcados em aeronaves ou satélites, podendo ser instalados de forma fixa ou mover-se em trilhos definidos próximos a superfície que se deseja monitorar.

De forma geral, o radar emite uma radiação eletromagnética denominada genericamente como microonda, que corresponde à região do espectro eletromagnético compreendida entre 225 MHz e 36 GHz, que permite a detecção de elementos distintos na superfície imageada. A Figura 17 demonstra as faixas de ondas, seus respectivos comprimentos e frequências, em que se pode encontrar a radiação eletromagnética.

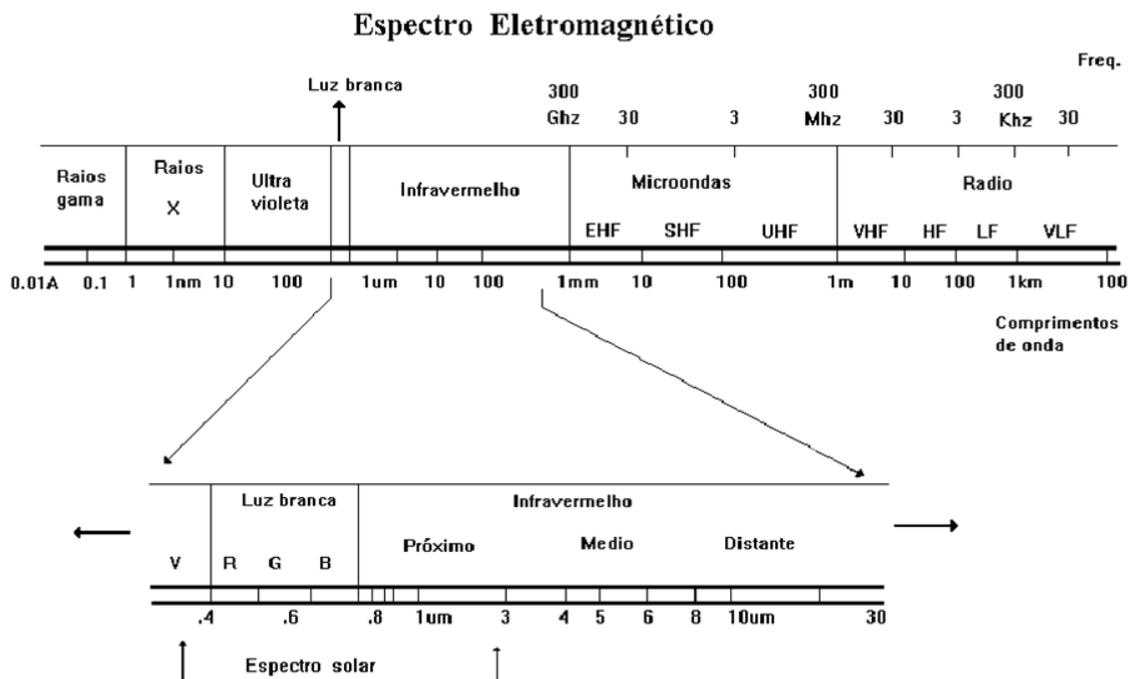


Figura 17: Comprimento e frequência de ondas no espectro eletromagnético
 Fonte: Novo, 1995

A emissão do pulso eletromagnético do radar funciona em várias bandas, que estão distribuídas na faixa das microondas. Alguns comprimentos destas ondas, permitem atravessar nuvens e tempestades, possibilitando o seu funcionamento independente das condições atmosféricas. (CURLANDER e MCDONOUGH, 1991). No que diz respeito a capacidade de penetração do sinal em alvos de interesse, considerando a existência de vegetação na área de

avaliada, comprimentos de onda, como o das bandas X e C, por exemplo, trazem informações sobre as camadas superficiais do dossel vegetal, e os da banda L e P, que têm uma penetração maior na vegetação, podem atingir alvos abaixo do dossel, podendo detectar galhos, troncos e até o próprio solo (DOBSON, 2000). Suas identificações e seus respectivos comprimentos e frequências estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 - Bandas na faixa das micro-ondas

Nome	Comprimento de onda λ (cm)	Frequência f (GHz)
K	0,83 – 2,75	36 – 10,9
X	2,75 – 5,21	10,9 – 5,75
C	5,21 – 7,69	5,75 – 3,9
S	9,69 – 19,4	3,9 – 1,55
L	19,4 – 76,9	1,55 – 0,39
P	76,9 – 133	0,39 – 0,225

Fonte: Nievinski, 2004

Além dos comprimentos de ondas, os sensores dos radares possuem características próprias a respeito do plano nos eixos de vibração das ondas que emitem, desde sua emissão até a sua captação pelo sensor, alternando entre os planos verticais e horizontais (Figura 18). Esta característica, chamada 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 urbanas, impactos relacionados a enchentes e terremotos, entre outros.

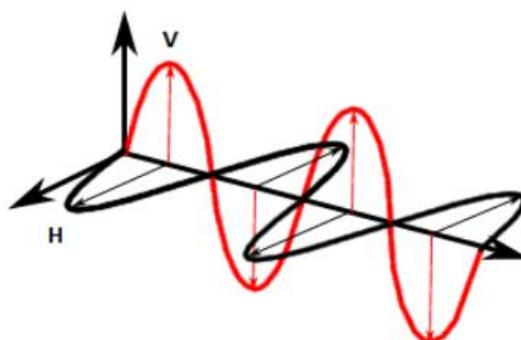


Figura 18 - Polarização horizontal e vertical da onda plana eletromagnética
Fonte: CCRS, 2019

Novo e Ponzoni(2001), mais do que comprimento de onda e a polarização, apontam aspectos inerentes e importantes das imagens formadas pelo sistema SAR como o ângulo de incidência, formado pelo radar e a superfície, resolução espacial, definida como a habilidade do sensor identificar dois alvos próximos como pontos distintos, a direção de imageamento, que se refere à orientação geométrica do feixe transmitido em relação a feições lineares do terreno, e o ângulo de incidência, formado pelo vetor que conecta o radar aos elementos do terreno e a direção vertical local., estas características são inerentes ao sistema do sensor radar.

Outrossim, estes autores afirmam a existência de variáveis inerentes à superfície imageada que também estão presentes o sinal captado, são elas forma geométrica, por exemplo a altura, porcentagem de recobrimento do substrato, a rugosidade da superfície, que é função da variação estatística da altura e largura das irregularidades da superfície, e a constante dielétrica, medida das propriedades dielétricas dos materiais, incluindo o grau com que absorve, reflete e transmite as micro-ondas em resposta à radiação incidente.

A quantização do sinal recebido pelo sensor após a interação com a superfície tem a forma de um número complexo, cuja parte real representa o componente em fase e a parte imaginária, o componente em quadratura (Figura 19). Esta quantização contabilizada para cada pixel que forma a superfície forma imagens denominadas SLC (Single Look Complex)

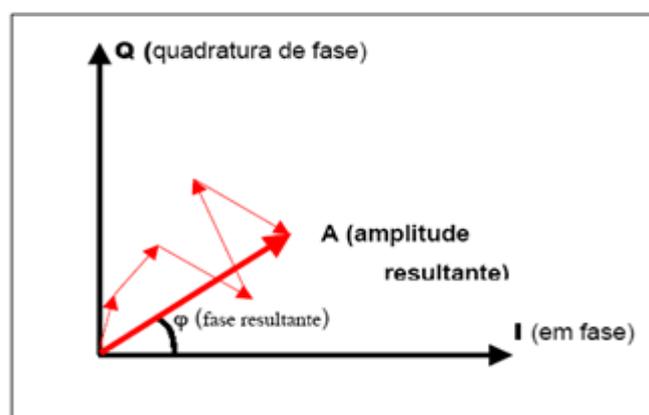


Figura 19 - Sinal SAR complexo - amplitude e fase resultantes
Fonte: GABOARDI, 2002

A Figura 20 apresenta alguns dos sistemas SAR em órbita e em operação com suas respectivas características. Uma vez que os sistemas SAR possuem sua própria fonte de energia para emissão da radiação, não dependendo de outra fonte emissora, podem atuar também de dia e noite, independente da iluminação solar, por exemplo.

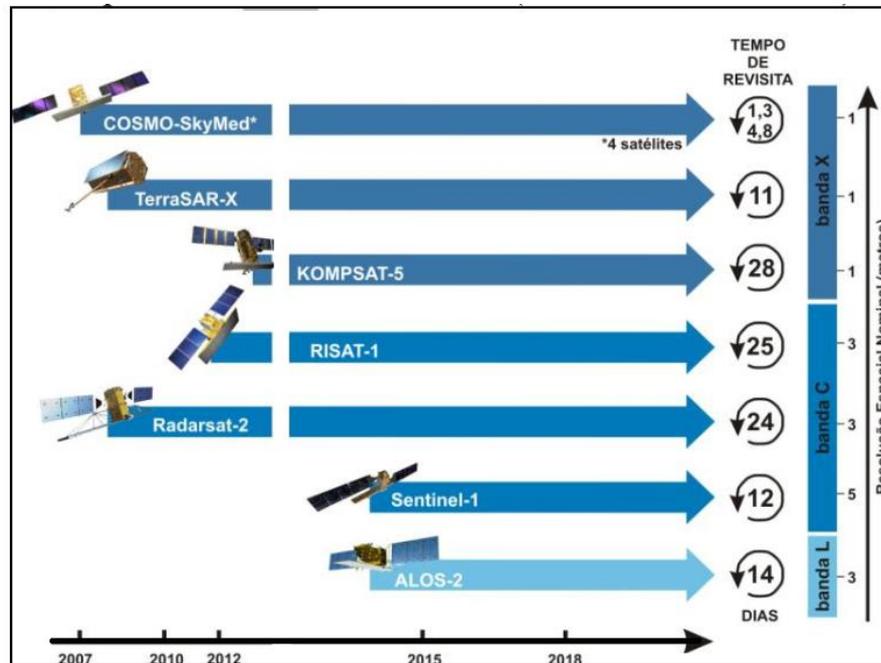


Figura 20 - Principais sistemas orbitais com SAR e suas características.
Fonte: UNAVCO, 2019 (Adaptado)

2.3.3. Características do imageamento do sistema SAR

Segundo Elachi (1988) o princípio de funcionamento de um radar imageador SAR obedece basicamente às seguintes etapas:

- A antena do sensor transmite um pulso de radiação na faixa das micro-ondas em direção ao solo;
- Quando o pulso atinge o solo ele se espalha em todas as direções;
- Uma porção desse espalhamento retorna na direção do radar, sendo chamado, portanto, retroespalhamento;
- A antena capta o sinal de retroespalhamento, registrando sua amplitude, fase, polarização e tempo de retorno;
- Os sinais captados dos diferentes pontos da superfície são posteriormente processados, em conjunto, para formar uma imagem da superfície imageada.

O sistema RADAR transmite um pulso de microondas numa direção perpendicular ao deslocamento da plataforma, esta direção de transmissão do pulso é conhecida como “range” ou alcance (próximo ou distante). Quanto ao movimento de deslocamento do radar, direção paralela, é conhecida como direção em azimute (tangente à linha de vôo). Tais direções são importantes uma vez que corresponderão, respectivamente, à direção das linhas e à direção das colunas na imagem produzida pelo radar.

A antena do sistema SAR é geralmente voltada para a direção perpendicular ao vetor de velocidade, o que compõe a chamada direção de visada. A Figura 21 apresenta os elementos que compõem a geometria do sistema SAR

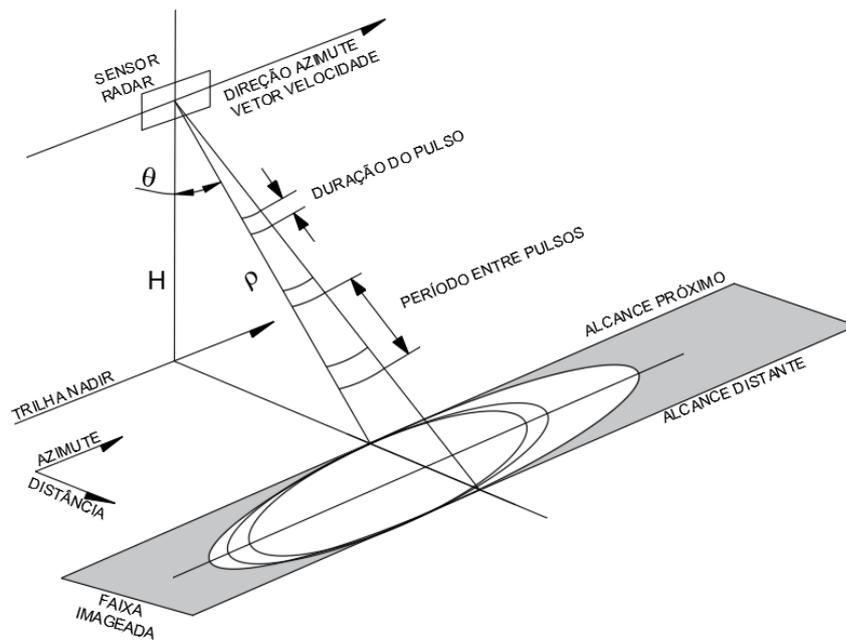


Figura 21 - Geometria de aquisição de imagens do sistema SAR
 Fonte: Skolnik, 1990 (Adaptado)

A radiação eletromagnética é emitida em pulsos em alta frequência, enquanto a plataforma se desloca conforme o vetor de velocidade ou direção em azimute, que definem a trilha do nadir (SKOLNIK, 1990). As sucessivas elipses representam a área alcançada por cada pulso dentro da faixa de imageamento do pulso. A superfície imageada é limitada ao alcance próximo ou *near range*, alcance distante ou *far range*, pelo tempo inicial e final da aquisição. A figura 22 representa o processo de geração de imagens do sistema SAR, composto por uma unidade transmissora, que emite a radiação eletromagnética em pulsos,

uma unidade receptora do retorno dos pulsos emitidos, que armazena e processa, a antena instalada na plataforma, que transmite e recebe o sinal de retorno, através de um comutador, para por fim, gerar o produto final que é a imagem.

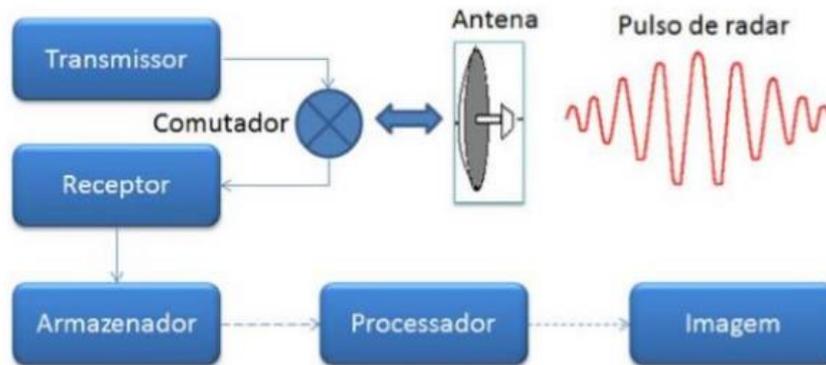


Figura 22 - Elementos básicos de um sistema radar
Fonte: SILVA, 2013

A imagem obedece a dois eixos definidos (plano bidimensional), representados por colunas e linhas, sendo “r” o alcance, que representa a distância perpendicular à linha de vôo; e o “a” o azimuth, distância ao longo da trajetória do vôo. (Figura 23).

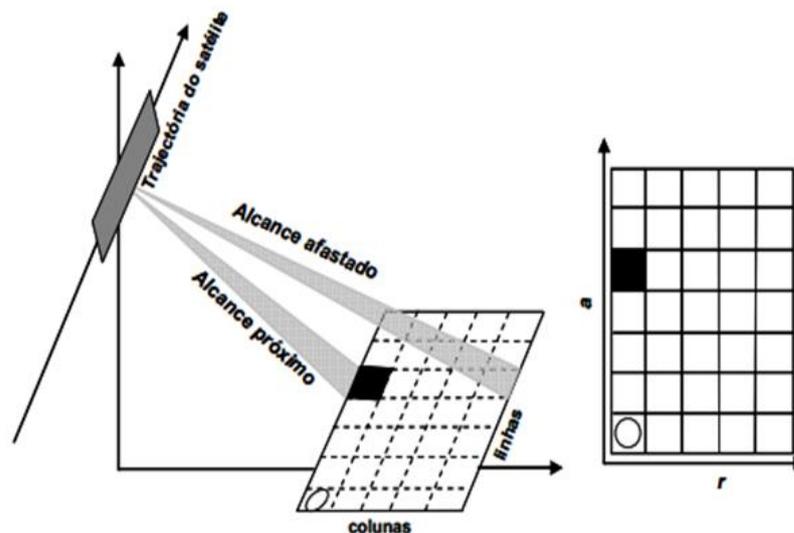


Figura 23 - Formação de imagem de radar
Fonte: Catita, 2007

Algumas distorções geométricas significativas podem estar presentes no processo de obtenção das imagens devido a visada lateral dos sensores SAR. Estas distorções são

conhecidas como encurtamento de rampa (foreshortening), inversão (layover) e sombra (shadowing).

O "layover" acontece quando o topo de um alvo é imageado antes da base, causando inversão do terreno, com as partes altas mapeadas como baixas e vice-versa. O "foreshortening" ocorre quando a área imageada possui relevo pronunciado. Neste caso as encostas voltadas para o nadir apresentam-se mais curtas. O sombreamento nas imagens ocorre quando não há o recebimento do sinal de retorno, este efeito ocorre atrás de declives muito acentuados. Para minimizar os efeitos destas distorções, imagens SAR devem passar por uma etapa de correção geométrica.(MURA, 2001)

a) Resolução Espacial ou Alcance

Como já mencionado anteriormente, a resolução espacial de um radar em range ou alcance (slant range) é a capacidade do radar em discriminar dois objetos numa direção, e é medida pela menor distância entre dois objetos separáveis pelo radar (CURLANDER e MCDONOUGH, 1991). A resolução em alcance é diretamente relacionada ao tamanho do pulso transmitido pelo sensor. O tamanho do pulso (ρ) pode ser entendido como o produto entre a velocidade da luz e o tempo de duração da transmissão do sinal do radar. Como este sinal viaja do sensor do radar até o alvo e retorna ao sensor, o tamanho do pulso é dividido por dois para que se determine a resolução em alcance, conforme demonstrado na Equação 1. Quanto menor o pulso, mais fina será a resolução. A configuração da resolução em alcance pode ser observada no esquema da Figura 24.

$$\rho_R = \frac{C\tau}{2} \quad (1)$$

Onde,

ρ_R : resolução em alcance

C: velocidade de propagação do sinal (velocidade da luz)

τ : duração de um pulso de radiação.

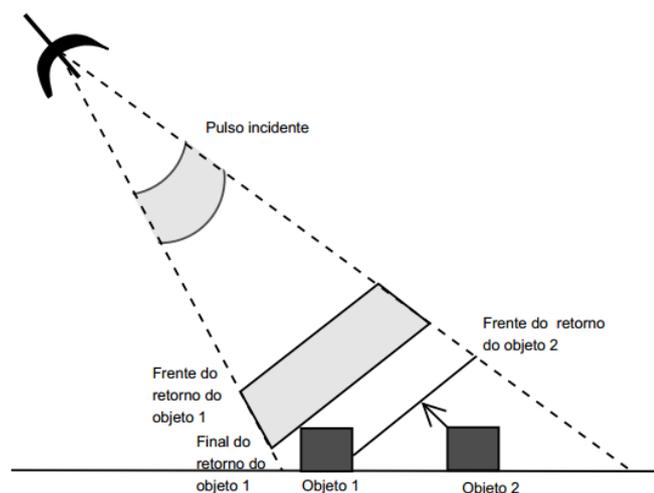


Figura 24 - Resolução na direção de alcance direto do radar.
Fonte: Nievinski, 2004

O tempo de duração (τ) do pulso proporciona diretamente a resolução na direção de alcance do pulso. Portanto o tamanho do pulso, pode aumentar a resolução caso a frequência deste pulso seja diminuída. Na prática, para aumentar essa resolução, faz-se uma codificação do pulso no domínio da frequência, ao invés de diminuir τ (Equação 2). A resolução em alcance é constante em toda a imagem (entre *near* e *far range*).

$$\rho_R \approx \frac{C}{2B} \quad (2)$$

Onde,

ρ_R : resolução em alcance

C : velocidade de propagação do sinal (velocidade da luz)

B : largura de banda utilizada na modulação em frequência do pulso.

b) Resolução em azimuth

A antena do sistema SAR define a resolução em azimuth e depende das características de sua abertura sintética. A resolução espacial é diretamente proporcional à

largura do pulso transmitido, enquanto que a resolução azimutal é inversamente proporcional ao tamanho da antena e diretamente proporcional à largura do feixe de radiação em azimute.

O tamanho da antena determina a largura do feixe em azimute, portanto torna-se um fator limitante para a resolução azimutal. Neste sentido, os radares de Abertura Sintética (SAR), foram desenvolvidos para solução dessa limitação antes encontrada nos chamados Radares de Abertura Real (RAR), sem a necessidade de se aumentar o tamanho físico da antena. Segundo Di Cenzo (1981), o aumento da resolução azimutal nos sistemas SAR é conseguido utilizando-se a informação de uma sequência inteira de pulsos ao longo da direção azimutal (e não apenas um pulso como nos RAR) para produzir uma simples faixa imageada. Ulaby (1982), cita como exemplo que para a obtenção de uma resolução azimutal de 10 m, usando-se um RAR operando com comprimento de onda de 3 cm e a uma distância do alvo de 400 km, necessitar-se-ia uma antena de tamanho 1,2 Km, o que poderia tornar o projeto inviável tecnicamente.

O SAR usa o efeito Doppler, retorno recebido de um pulso enviado que sofre uma variação de frequência devido a velocidade V da plataforma, e o histórico das mudanças de fase a ele associado para simular uma antena cujo comprimento é muitas vezes maior que o da antena real. Este processo é obtido eletronicamente, daí o termo "Abertura Sintética". A resolução azimutal no SAR é independente da largura do pulso transmitido e é aproximadamente igual à metade do tamanho físico da antena,

Desta forma, considerando-se um mesmo tamanho físico da antena, o SAR possui resolução azimutal superior à do RAR. Quando o objeto é visto pela primeira vez pela antena ao longo de sua trajetória em azimute, múltiplos ecos refletidos pelo alvo são gravados pelo sistema até que o mesmo esteja fora do alcance da antena. Os múltiplos retornos de um único alvo que chegam no sensor são transformados em uma única resposta, incrementando a resolução em azimute de quilômetros para alguns centímetros (HANSSEN, 2001).

2.3.4. Interferometria diferencial -InSAR

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 é a medida fundamental em InSAR, também chamada de fase interferométrica. A fase do sinal que um SAR fornece é igual a duas partes demonstrada na Equação 3 (ZEBKER, 2000):

$$\varphi = \varphi V + \varphi E \quad (3)$$

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 s_1 e s_2 , então diferenciando a fase φ_1 e φ_2 dos dois, independente do tempo, teremos a diferença expressa pela Equação 4:

$$\varphi = \varphi V1 - \varphi V2 \quad (4)$$

O cálculo de uma determinada posição do ponto P na superfície do terreno (Figura 25) 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 no mesmo instante, casos em que a plataforma, seja orbital ou aerotransportada, permite a instalação de radares com duas aquisições simultaneas (Figura 26).

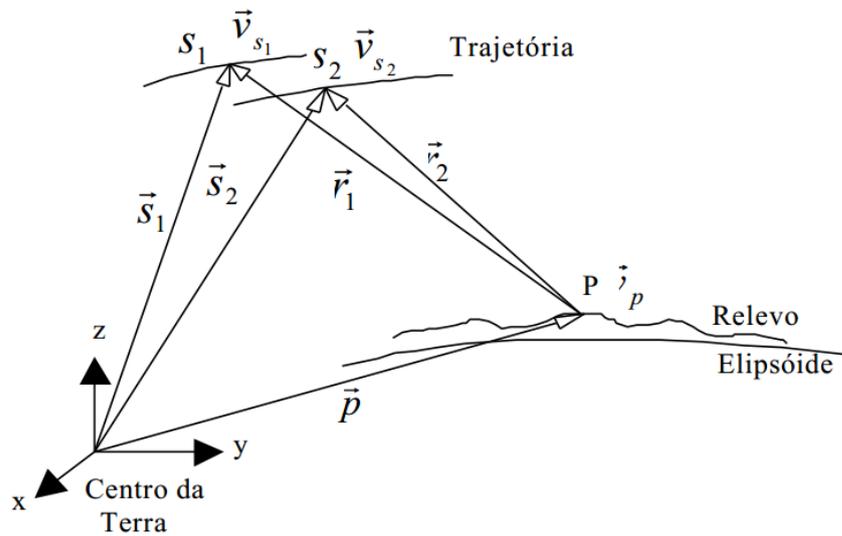


Figura 25 - Representação geométrica do posicionamento de um ponto P na superfície imageada em tempos distintos.

Fonte: Nievinski, 2004

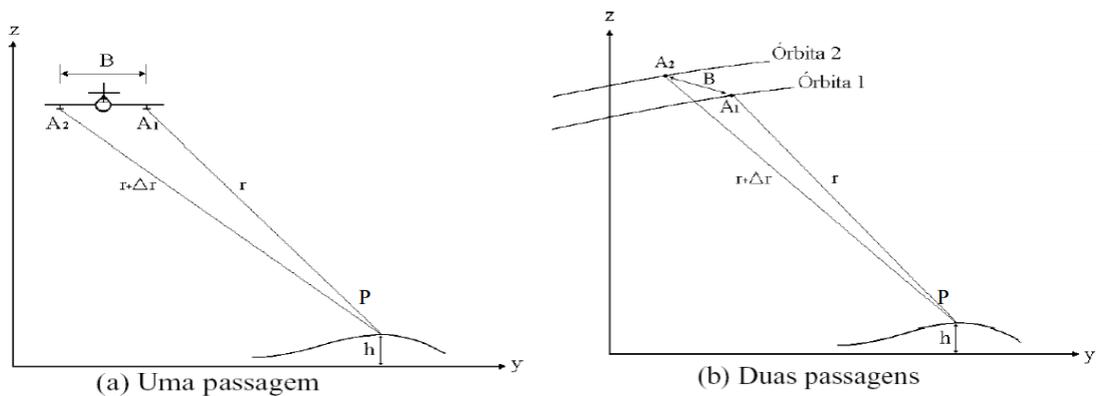


Figura 26 - Modos de aquisição do par interferométrico: (a) uma passagem; (b) duas passagens

Fonte: Mura, 2001.

Os sensores orbitais SAR podem descrever órbitas descendentes e ascendentes, o que leva a alterações na interação entre as ondas da radiação eletromagnética emitida e a superfície imageada. Isto ocorre pois o ângulo de incidência e o retroespalhamento sofrem alterações. (SARAIVA, 2015)

Torna-se, portanto, importante salientar que para a obtenção do vetor completo do deslocamento, é preciso observações adicionais a partir de direções diferentes, combinando, p.ex., um interferograma gerado com imagens tomadas em uma órbita descendente com um

interferograma de imagens de uma órbita ascendente, a partir das quais pode-se obter deslocamentos em direções diferentes. (PARADELLA, 2015)

2.3.5. Processamento InSAR

Como já abordado, a principal medida em InSAR na verificação de deslocamentos é a diferença de fase. A diferença entre as fases encontradas em duas tomadas de cena, ressalvadas as devidas correções, permite analisar os deslocamentos numa determinada superfície (GOLDSTEIN et al, 1988).

Ferretti et al (2001) e Colesanti et al (2003) definem que as medições das ondas realizadas pelo InSAR são especialmente sensíveis à topografia, movimento do solo, atraso atmosférico, separação espacial entre satélites e propriedades elétricas do solo, então o sinal da fase InSAR carrega informações sobre todos esses fatores, e dependendo da aplicação, alguns deles podem ser considerados ruídos. Este somatório é demonstrado na Equação 5.

$$\phi\Delta t = \phi d + \phi h + \phi atm + \phi\beta + \phi\eta \quad (5)$$

Onde

$\phi\Delta t$: *variação na fase*

ϕd é a mudança de fase devido ao deslocamento do pixel na direção da linha de visão do satélite (LoS);

ϕh é o erro topográfico da fase;

ϕatm é o atraso da fase atmosférica;

$\phi\beta$ é a fase residual devido a erros de órbita; e

$\phi\eta$ é o ruído de fase.

O processo de obtenção da elevação e deslocamento do terreno a partir do conhecimento da diferença de fase segue as etapas básicas sequenciais listadas abaixo e explicadas em seguida.

- i. Corregistro das imagens do par interferométrico;
- ii. Geração do interferograma (imagem interferométrica);
- iii. Geração da imagem de Coerência;
- iv. Remoção da fase de terra plana;

- v. Redução do ruído de fase;
- vi. Desdobramento da fase (Phase Unwrapping);
- vii. Geração do mapa de deslocamento.

a) Corregistro das imagens do par interferométrico

A configuração InSAR de passagens repetidas baseia-se na aquisição de duas ou mais imagens em momentos diferentes nos quais só se conhece parcialmente as informações de órbitas. Esse relativo desconhecimento ocasiona uma incompatibilidade geométrica entre as duas imagens do par interferométrico, sobretudo nos casos de passagens em momentos distintos. O corregistro serve para minimizar esse problema, coincidindo geometricamente as duas imagens (Figura 27) e favorecendo tanto o processo de geração do interferograma quanto a estimativa de coerência.

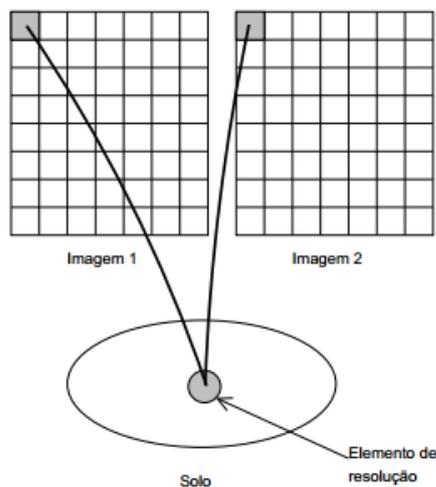


Figura 27 – Corregistro de imagens
Fonte: Nievinski, 2004

Portanto, o objetivo do corregistro de imagens é determinar a transformação que deverá mapear a localização do pixel de uma dada imagem sobre uma imagem de referência. Após a reamostragem dos pixels decorrente do corregistro, as imagens do par interferométrico podem ser consideradas idênticas em termos de tamanho e matrizes de valores complexos, possibilitando a formação de interferogramas a partir do produto entre o valor complexo do pixel da imagem de referência e sua conjugada correspondente.

b) Geração do interferograma

Duas imagens corregistradas cujos pixels descrevem o sinal complexo correspondente ao mesmo elemento da superfície imageada permitem a geração da imagem resultado da diferença de fase, pixel a pixel, chamada interferograma. (NIEVINSKI, 2004)

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 6) apresenta um resultado modulado compreendido entre 0 e 2π (fase dobrada). (SILVA, 2009)

$$p(x, y) = S_1(x, y) S_2^*(x, y) \quad (6)$$

Onde:

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

S_1 é o valor do pixel na imagem mestre SLC

S_2 é o complexo conjugado do pixel da imagem escrava.

c) Geração da imagem de coerência

A coerência interferométrica é o grau de correlação entre duas imagens SAR no formato complexo que formam um par interferométrico. Representa um parâmetro que caracteriza a qualidade de cada par de imagens corregistradas. (ZEBKER et al., 1992a)

A informação da coerência obtida no processo de criação do interferograma permite, portanto, medir o nível de correlação de dois sinais correspondentes, variando entre o valor mínimo zero (onde não há correlação) e o máximo de 1 (correlação perfeita), dada pela equação 7.

$$\gamma_{S_1 S_2} = \frac{|\langle S_1 S_2^* \rangle|}{\sqrt{(\langle |S_1|^2 \rangle \langle |S_2|^2 \rangle)}} \quad (7)$$

Onde:

$\gamma_{S_1 S_2}$ representa o valor da coerência do pixel localizado em (x, y)

S1 e S2 representam os valores complexos dos pixels das duas cenas

< > representa a média espacial

Segundo Canada Center for Remote Sensing - CCRS (1999) a coerência interferométrica (γ) indica, no par interferométrico, se uma superfície-alvo têm comportamento coerente ou incoerente. Silva (2009) menciona que aplicações de InSAR com propósitos na Cartografia, devem ter módulo de γ superior a 0,7. A Tabela 5 demonstra os limiares da coerência.

Tabela 5 - Limiares de coerência

COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA	QUALIDADE
0,0 - 0,3	BAIXA
0,3 - 0,5	MODERADA
0,5 - 0,7	BOA
0,7 - 1,0	EXCELENTE

Fonte: CCRS, 1999

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

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

d) Remoção da fase de terra plana

Pode-se perceber que, mesmo que o ponto P da Figura 28 esteja posicionado em uma região plana, haverá diferença entre as distâncias do ponto P às antenas A1 e A2. Em função disso, um interferograma de uma região totalmente plana terá a representação do relevo posicionado perpendicular à direção de deslocamento da plataforma, e este interferograma

resultará em um modelo de terreno representado por uma rampa plana, não correspondendo à topografia do terreno.

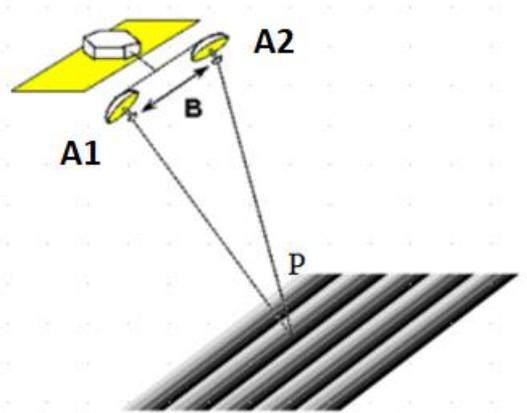


Figura 28 - Representação da contribuição da terra plana para a fase interferométrica.
Fonte: Rosa, 2004

Esta contribuição chamada de fase de terra plana, causada pela própria geometria do imageamento na fase interferométrica precisa ser removida, mantendo-se apenas a componente da fase relativa à topografia do terreno.

A Figura 29 mostra um interferograma com a presença da fase de terra plana (Figura 29a) e com a fase de terra plana removida (Figura 29b).

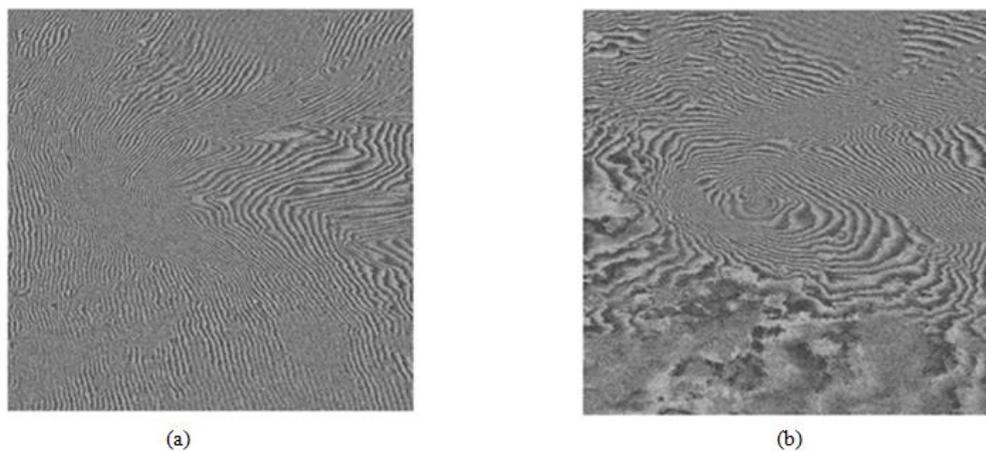


Figura 29 - (a) Interferograma com a presença da fase de terra plana e (b) Interferograma com a fase de terra plana removida.
Fonte: Rosa, 2004. (Adaptado)

Ainda no processo de formação da imagem, o pixel que forma a imagem interferométrica poderá ser mais ou menos escuro, a depender do ângulo de incidência da radiação, tal como se apresenta na Figura 30.

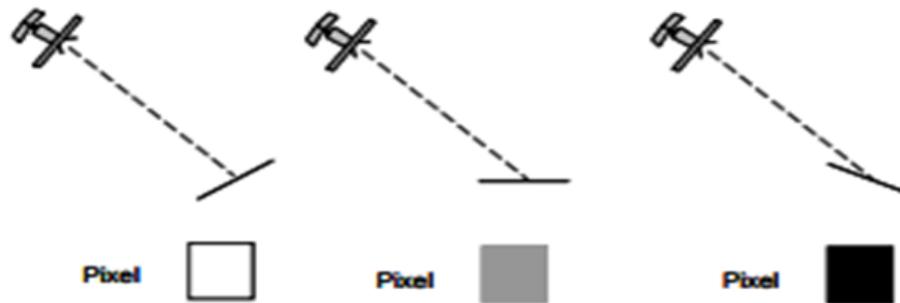


Figura 30 - Reflectância da imagem simulada em função do declive local do terreno
Fonte: Catita, 2007

e) Redução dos ruídos de fase.

A qualidade da informação da fase interferométrica pode ser degradada por ruídos existentes, comprometendo sua aplicação em determinadas pesquisas, sendo a estimativa de coerência a medida da correlação da informação da fase correspondente aos sinais que geram cada uma das duas imagens que originam um interferograma (GENS, 1998).

Estes ruídos inerentes ao sistema e à interação radar-superfície alteram a fase do sinal e provocam a degradação da qualidade do interferograma. Mura (2001) relaciona os possíveis ruídos encontrados em medições interferométricas:

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

Vários filtros podem ser utilizados, sendo mais comum a utilização do filtro da média espacial dos dados complexos, que envolve também os valores de fase. Além do filtro da média, podem ser utilizados outros tipos de filtros com menor perda de resolução espacial,

como os filtros da mediana, da moda, e morfológicos ou filtros baseados em processos adaptativos que utilizam as estatísticas da vizinhança local do interferograma (MURA, 2001).

f) Desdobramento da Fase (Phase Unwrapping)

O desdobramento da fase é tarefa essencial na sequência do processamento InSAR visando a obtenção da elevação do terreno a partir dos valores de diferença de fase extraídos do interferograma.

A fase interferométrica representada no interferograma possui ambiguidade, representada de 0 a 2π , o que implica no desconhecimento do número de ciclos que a radiação eletromagnética completou no seu percurso até o retorno à antena e tal fato deve ser removido, sendo necessário transformar a fase relativa em fase absoluta. Essa necessidade de se calcular a fase absoluta provoca a execução de um tipo específico de processamento interferométrico, definido como “desdobramento de fase”.

Como afirma Mura (2001), os algoritmos para desdobramento da 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

Na determinação do deslocamento dos alvos, as observações são realizadas em instantes $t_2 > t_1$ diferentes, onde o vetor de deslocamento D corresponde ao ocorrido no período t_1-t_2 . Para tanto são realizadas combinações entre as imagens para geração dos interferogramas sobre a região de interesse. (SANDWELL e PRICE, 1998)

Os mapas de deslocamentos são gerados após o desdobramento de fase e resolução da ambiguidade, o que define, portanto, uma superfície topográfica. Considerando um Modelo Digital de Elevação (MDE), é possível verificar a variação na superfície, ou seja, os deslocamentos, efetuando-se a diferença entre as informações da superfície do MDE utilizado e a superfície gerada pela diferença de fase (absoluta) nos interferogramas. Ressalta-se que altitudes estimadas por modelos digitais podem não representar adequadamente a superfície de interesse e como consequência, os pontos monitorados podem apresentar deslocamento inadequados. Isto pode ser evitado caso haja um levantamento por GPS ou planialtimétrico do

local de interesse pois a estimativa do valor da altitude do alvo influencia a estimativa do deslocamento.

2.3.6. Determinação dos deslocamentos superficiais.

Os deslocamentos, segundo Chaves (2001), definidos por métodos geodésicos realizam-se em absolutos, que são aqueles calculados ou medidos, considerando um referencial imóvel em relação ao ponto medido, e relativos, aqueles cujo referencial também se desloca. Guimarães (2008), define que a materialização das referências de nível (RRNN), em métodos topográficos, pode sofrer deslocamentos, em função de influências como geodinâmicas da superfície, destruição ou obstrução das estruturas altimétricas implantadas e aluimento da crosta terrestre, alterando a posição vertical das RRNN.

Uma rede absoluta é composta por pontos estabelecidos fora do corpo deformável, e esses pontos são usados como pontos de referência para determinar o deslocamento de marcos superficiais. Moura (2008) aponta como principal problema na análise geométrica de redes absolutas, a determinação de pontos de referência estáveis. Em uma rede relativa, todos os pontos a serem estudados estão no objeto para identificação do modelo de deformação.

Na técnica InSAR, o monitoramento de um determinado alvo no solo depende da estabilidade de reflexão dos alvos, definida pela coerência, em pelo menos duas aquisições de imagens. Os alvos podem ser conhecidos como alvos distribuídos (DT), aqueles que não são dominados por um único objeto que forma um pixel da imagem, mas com muitos sub-objetos que contribuem coletivamente no sinal que retorna ao sensor, por exemplo, edificações e estradas, existem ainda os alvos pontuais (PT), aqueles pixels da imagem SAR dominado por um único objeto, ideais para o monitoramento contínuo com precisão milimétrica, podendo ser constituídos por estruturas naturais ou antropizadas no terreno, como exemplo, os marcos superficiais na crista de barragem, ou ainda serem construídos para o fim específico de monitoramento como por exemplo os refletores de canto (Corner Reflector).

Considerando a resolução espacial das imagens utilizadas e os marcos superficiais disponíveis para execução deste trabalho, verifica-se que o tamanho do pixel (5x20m) é maior que a dimensão total dos mesmos (1x1m), sendo assim, não foi possível considerar os pixels como PT, o que leva a perda da qualidade do monitoramento do deslocamento já que considera objetos diversos num único pixel, não permitindo assim, a localização acurada dos

marcos superficiais, embora os alvos DT também possam ser utilizados para medições do deslocamento contínuo do solo, apresentando densidade maior do que PT no terreno natural.

2.3.7. A aplicação da técnica INSAR na detecção de movimentos superficiais em barragens.

A técnica InSAR, voltada para detecção de movimentos superficiais do terreno, difundida internacionalmente, vem sendo empregada no Brasil mais recentemente como uma possível alternativa ao monitoramento de barragens. A tabelas 6 e 7 trazem alguns exemplos de trabalhos desenvolvidos neste contexto.

Tabela 6 – Referências sobre a aplicação de InSAR no monitoramento de barragens.

Autores	Ano	Título	Área de estudo	Sensores utilizados	Resultados e observações principais
ZHOU, W et al	2016	InSAR Observation and Numerical Modeling of the Earth-Dam Displacement of Shuibuya Dam (China)	Barragem localizada no rio Qingjiang, Enshi, Província de Hubei, China.	ALOS-1 PALSAR (resolução espacial: 3 m)	Coerência: valores não citados. Os resultados dos deslocamentos concordaram bem com os valores de nivelamento observados em magnitude e distribuição (recalque máximo de 2,332 m, aproximadamente 1% da altura da barragem).
DE ATHAYDE PINTO, C et al.	2017	O uso da tecnologia InSAR (interferometria de radar de abertura sintética) para o monitoramento da estabilidade de barragens	Minas Gerais, Brasil	Cosmo SkyMed (resolução espacial: 1 m)	Coerência: valores não citados. Velocidades de deslocamento detectadas em diferentes diques: 72,80 mm/ano, 16,80 mm/ano, 29,90 mm/ano e -10,0 mm/ano. A presença de vegetação e alterações na superfície promovem baixa coerência. Limitação: baixa densidade de pontos em áreas não urbanas ou áreas sem infraestruturas.
CORSETTI, M. et al	2018	Advanced SBAS-DInSAR Technique for Controlling Large Civil Infrastructures: An Application to the Genzano di Lucania Dam.	Barragem de terra Genzano di Lucania.	ERS-1 e 2 (resolução espacial: 30 m)	Coerência: valores não citados. Velocidade média máxima de 15,5 mm/ano. Deslocamentos verticais atingiram valores máximos de 232,5 mm (período 1992-2007 ao longo da crista da barragem) Presença de vegetação a jusante da barragem não permitiu o monitoramento por falta de dispersores coerentes.

Tabela 6 - Referências sobre a aplicação de InSAR no monitoramento de barragens (continuação)

Autores	Ano	Título	Área de estudo	Sensores utilizados	Resultados e observações principais
PATRÍCIO, E. G. R.	2018	Avaliação da Tecnologia InSar para Monitorização de Grandes Obras	Barragem do Alto Ceira, a barragem da Raiva e de Paradela em Portugal e barragem de Gabčíkovo-Nagymaros, na Eslováquia	ERS (resolução espacial: 30 m), ASAR (resolução espacial: 10 m) e TerraSAR-X (resolução espacial: 1 m)	Coerência: foram considerados no estudo os resultados para valores de coerência acima de 0,4. Nas barragens da Raiva e Paradela, com imagens Envisat, foram obtidas velocidades de deformação de 2 e 5 mm/ano. Na barragem de Cunovo a análise foi efetuada em imagens obtidas pelo satélite TerraSAR-X, com melhor resolução espacial, e com uma série temporal de 3 anos, verificando velocidades de deslocamentos de 5mm/ano. Limitação: presença de vegetação próximo aos pontos monitorados.
NEGRÃO, P. et al.	2018	Detecção de deslocamentos superficiais no complexo minerador de Germano, Mariana-MG, com técnica integrada de A-DINSAR utilizando dados TERRASAR-X	Minas Gerais, Brasil.	TerraSAR-X (resolução espacial: 1 m)	Coerência: foram considerados no estudo os resultados para valores de coerência acima de 0,45. Nas diferentes estruturas de barramento foram detectadas velocidades máximas de deslocamentos variando de -20,02 mm/ano a -86,36 mm/ano. Limitação: presença de vegetação próximo aos pontos monitorados.
F. GAMA, F. et al	2020	Deformations Prior to the Brumadinho Dam Collapse Revealed by Sentinel-1 InSAR Data Using SBAS and PSI Techniques	Minas Gerais, Brasil.	Sentinel-1 (resolução espacial: 5 m x 20 m)	Coerência: foram considerados no estudo os resultados para valores de coerência acima de 0,45. Nas diferentes estruturas de barramento foram detectadas velocidades máximas de deslocamentos variando de -20,02 mm/ano a -86,36 mm/ano. Limitação: presença de vegetação próximo aos pontos monitorados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Obtenção das imagens SAR do sensor Sentinel 1

Foram obtidas 07 imagens referentes a 2017, 13 imagens referentes a 2018 e 13 imagens referentes a 2019, possibilitando a combinação aos pares entre eles. Todas as imagens possuem nível de processamento SLC (Single-Look Complex), que mantém a informação de fase do sinal, imprescindível para o processamento interferométrico. As imagens foram adquiridas no portal de imagens da Agência Espacial Européia (ESA) por meio do Programa de Observação da Terra da União Europeia, COPERNICUS, cumpre ressaltar que no momento da aquisição, existiam apenas imagens a partir de junho de 2017, impossibilitando análises em períodos anteriores. (ESA, 2019)

A missão Sentinel-1 (Figura 31a) é composta por uma constelação de dois satélites de órbita polar, Sentinel-1A e Sentinel-1B, que operam na banda C. Os dois satélites partilham a mesma órbita plana com uma diferença posicional de 180° (Figura 31b). Cada satélite tem um ciclo de 12 dias e 175 órbitas por ciclo.

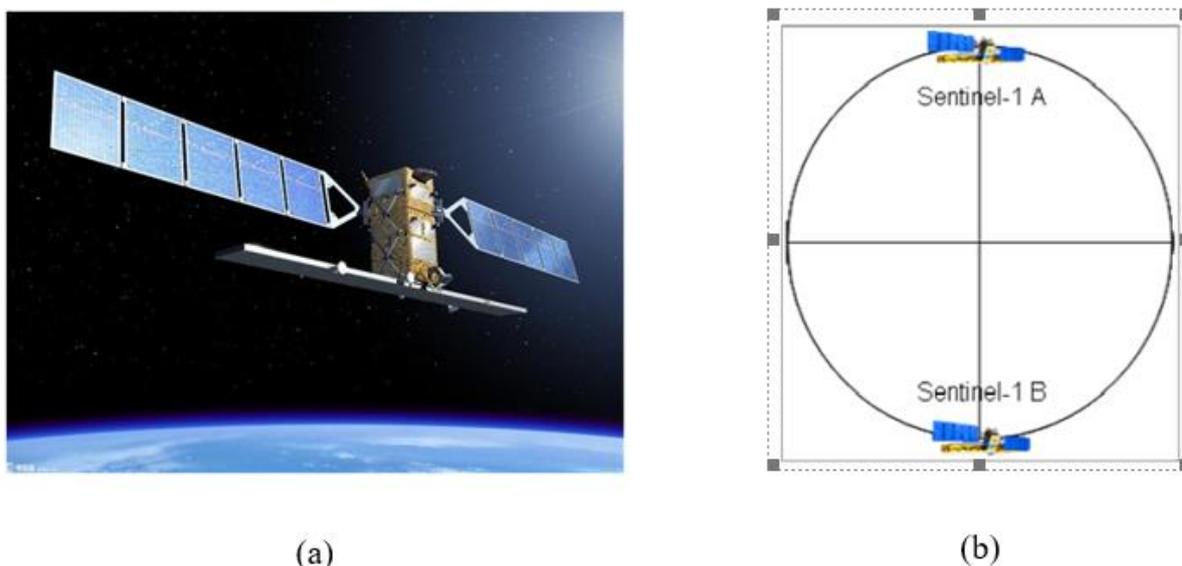


Figura 31 - a) Satélite Sentinel e b) Constelação Sentinel
Fonte: ESA, 2019

O sensor tem a capacidade de operar nos modos de dupla polarização HH/HV ou VV/VH e polarização única HH ou VV (Tabela 7), e possui quatro modos de aquisição

distintos: SM (Stripmap Mode), IW (Interferometric Wide Swath Mode), EW (Extra-Wide Swath Mode) e WV (Wave Mode), Figura 32.

Tabela 7 - Parâmetros dos modos de aquisição da missão Sentinel-1

Modo	Ângulo Incidente	Resolução Espacial	Largura de Faixa	Polarização
SM	20° - 45°	5 × 5 m	80 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
IW	29° - 46°	5 × 20 m	250 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
EW	19° - 47°	20 × 40 m	400 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
WV	22° - 35° 35° - 38°	5 × 5 m	20 × 20 km	HH, VV

Fonte: ESA, 2019

O modo IW, utilizado neste trabalho, é o modo principal de aquisição de dados sobre a terra e satisfaz a maioria das necessidades dos serviços. Os dados são adquiridos com uma faixa de 250 km e uma resolução espacial de 5 metros por 20 metros (ESA, 2013).

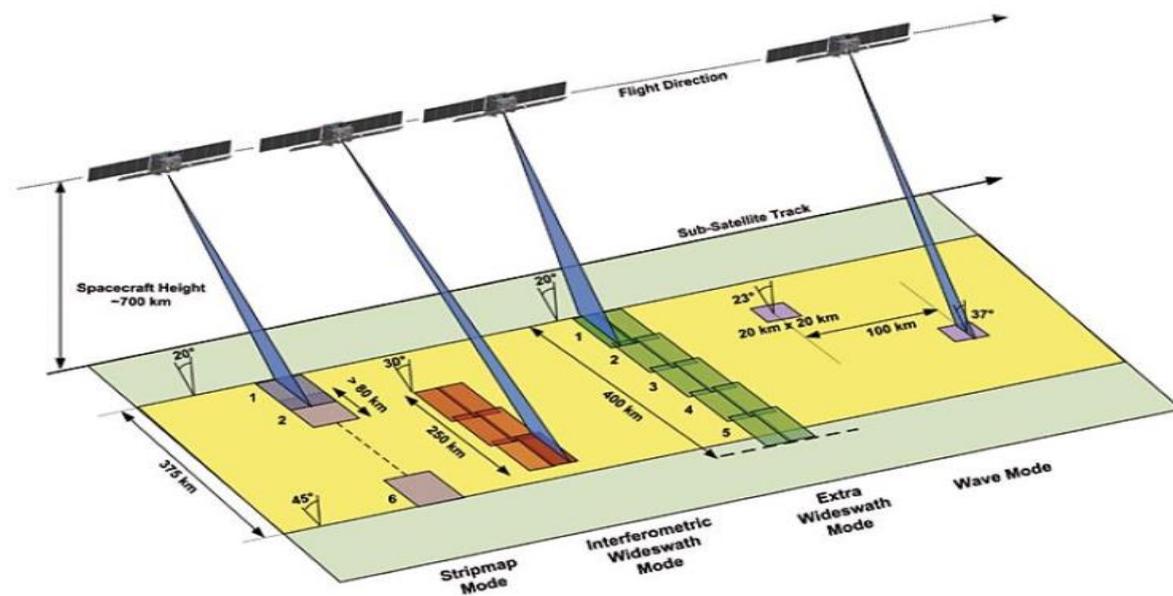


Figura 32 - Configuração dos diferentes modos de aquisição do Sentinel 1.

Fonte: ESA, 2019.

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 33).

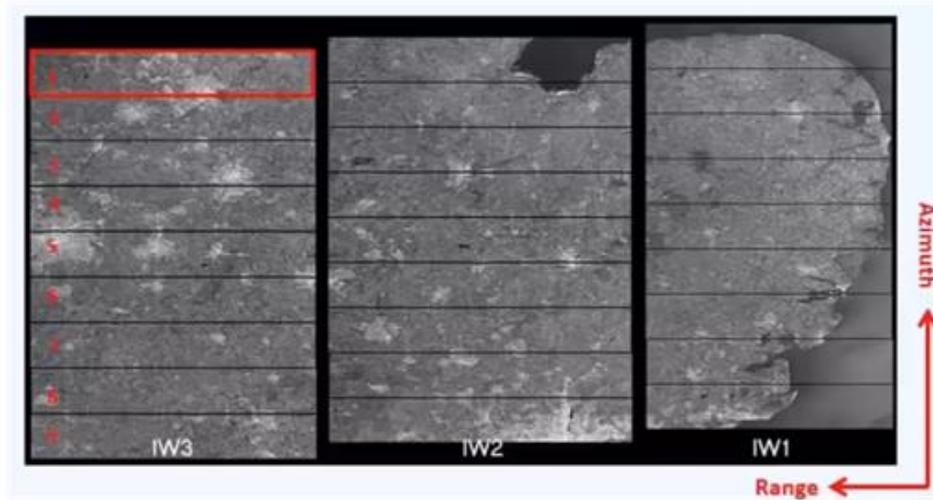


Figura 33 - Faixas de imageamento do Sentinel 1.
Fonte: ESA, 2019

A figura 34 apresenta a área de extensão da imagem, entretanto, foram utilizadas apenas as subfaixas 1, 2 e 3 (Figura 35), pois possuem o enquadramento da região de estudo.



Figura 34 - Área de extensão da imagem.
Fonte: ESA, 2019

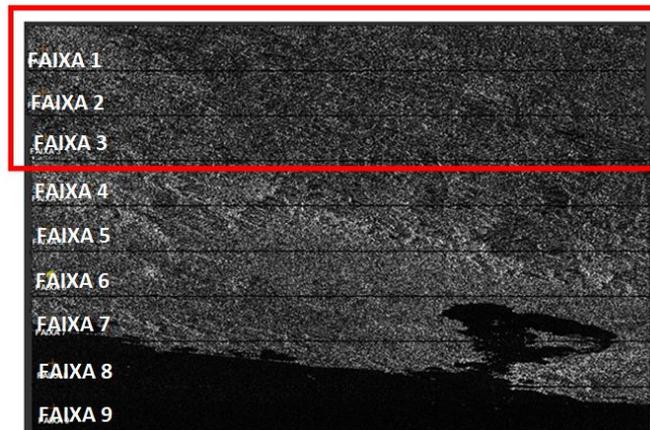


Figura 35 - Faixas e subfaixas de imageamento da região de interesse do presente estudo.
Fonte: Autor, 2019

3.2. Processamento INSAR

A Agência Espacial Européia (ESA) desenvolveu um software de código aberto para a exploração científica de missões de observação da Terra, denominado Sentinel Application Platform (SNAP). O software consiste em uma coleção de ferramentas de processamento, leitores e gravadores de produtos, de dados e um aplicativo de exibição e análise para suportar arquivos de dados das missões SAR, incluindo SENTINEL-1, ERS-1 e 2 e ENVISAT, bem como dados SAR de terceiros do ALOS PALSAR, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed e RADARSAT-2. (ESA, 2019)

A versão utilizada foi v7.0 e dentre suas funcionalidades, a criação de uma cadeia de processamento computacional automática possibilita o processamento em lote de cada par interferométrico. O processamento foi dividido em três etapas e correspondem resumidamente à execução do corregristo, geração da imagem coerência, remoção da fase de terra plana, redução do ruído de fase, desdobramento da fase e geração do mapa de deslocamento. 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 produtos mapa de coerência, interferogramas e deslocamentos superficiais ao final do processamento das três etapas.

Após a aquisição e carregamento das imagens no software, a etapa inicial, Figura 36, tem como primeiro operador o “TOPSAR-Split”, como parâmetro inicial, identifica-se a faixa ou as faixas da imagem que contém a área de interesse.

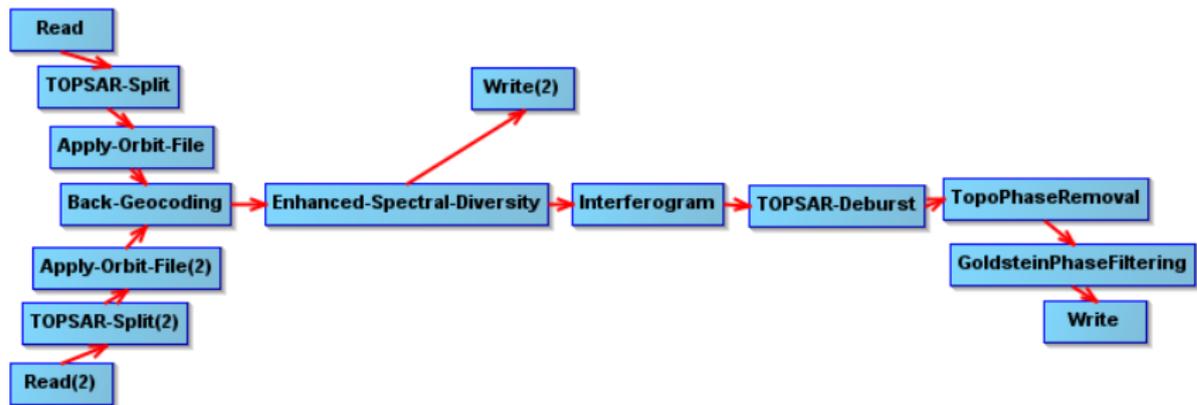


Figura 36 - Construtor gráfico de processamento automático para a geração dos mapas de interesse – Etapa 1
Fonte: Autor, 2019.

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. O operador “BACK GEOCODING” executa o corregristo e a geocodificação das imagens, admitindo-se uma imagem escrava em relação a uma imagem principal (mestre). Neste operador, deve-se definir o MDE utilizado no processamento, neste caso o SRTM 1Sec fornecido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), organizados em faixas de 1°x1° com 30 m de resolução vertical e o método de interpolação adotado, o Vizinho mais próximo, que mantém os valores dos níveis de cinza da imagem sem gerar valores intermediários, este interpolador preserva as estatísticas da imagem.

Este operador promove 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.

A precisão da conversão entre as geometrias do radar e do terreno é diretamente proporcional à qualidade e resolução espacial do MDE e irá influenciar na precisão dos resultados finais do estudo InSAR, corrigindo inclusive as possíveis distorções geométricas SAR que possam existir na obtenção da imagem.

O operador “ESD” (Diversidade Espectral Aprimorada) explora os dados entre as imagens e executa a correção de alcance e azimute para cada faixa. O operador “INTERFEROGRAM” produz o par interferométrico e a imagem de coerência.

Uma vez que são utilizadas subfaixas da imagem no processamento, o operador “TOP DEBURST” executa uma reamostragem para garantir a cobertura contínua do solo. O

resultado do processamento é um arquivo que contém informações sobre as imagens complexas, “i” e “q”, intensidade, fase e coerência, (Figura 37).

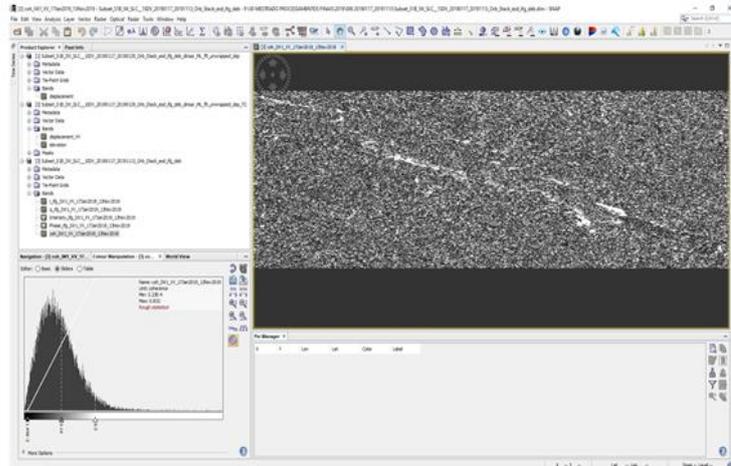


Figura 37 - Obtenção do mapa de coerência
Fonte: Autor, 2019

Após a geração dos interferogramas e suas estimativas de coerência, elabora-se nova cadeia de processamento automática, representando a segunda etapa, com a aplicação dos operadores de “TOPO PHASE REMOVAL” para remoção do efeito de terra plana, “MULTILOOKING” para melhorar a confiabilidade do desdobramento da fase, “GOLDSTEIN PHASE FILTERING” para filtragem e suavização dos ruídos temporais e geométricos e “SNAPHU EXPORT” para exportação do interferograma com fase dobrada.

A Figura 38 demonstra a arquitetura da cadeia de processamento e os operadores utilizados na segunda etapa do processamento.

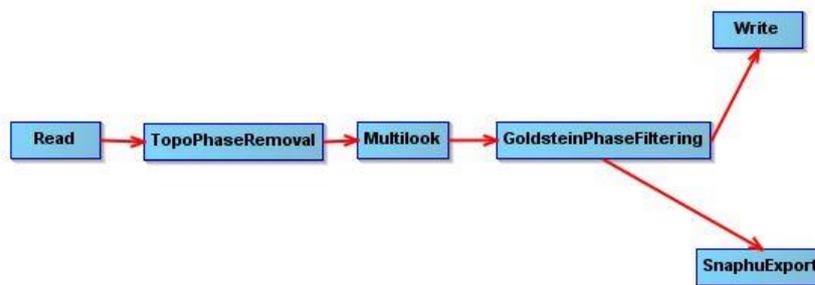


Figura 38 - Construtor gráfico de processamento automático para a geração dos mapas de interesse – Etapa 2
Fonte: Autor, 2019.

A terceira e última etapa do processamento considera as informações de parâmetros e fase, contidas no arquivo exportado pela etapa anterior. Um novo construtor gráfico é definido para a geração do mapa de deslocamentos. A Figura 39 demonstra os operadores utilizados no processamento final.

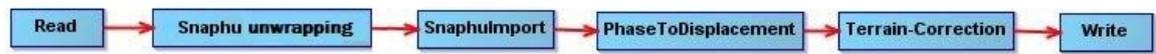


Figura 39 - Construtor gráfico de processamento automático para a geração dos mapas de interesse – Etapa 3
Fonte: Autor, 2019.

Nesta etapa são utilizados os operadores “SNAPHU-UNWRAPPING” e “SNAPHU-IMPORT”, para criação e a importação de nova imagem com fase desdobrada, bem como “PHASE TO DISPLACEMENT”, que gera uma imagem raster com as informações métricas para os deslocamentos superficiais de cada pixel e o “TERRAIN CORRECTION”, que codifica geograficamente o mapa de deslocamentos (Figura 40), sendo utilizado o sistema UTM (Universal Transverse Mercator) e o Datum de referência o WGS84.

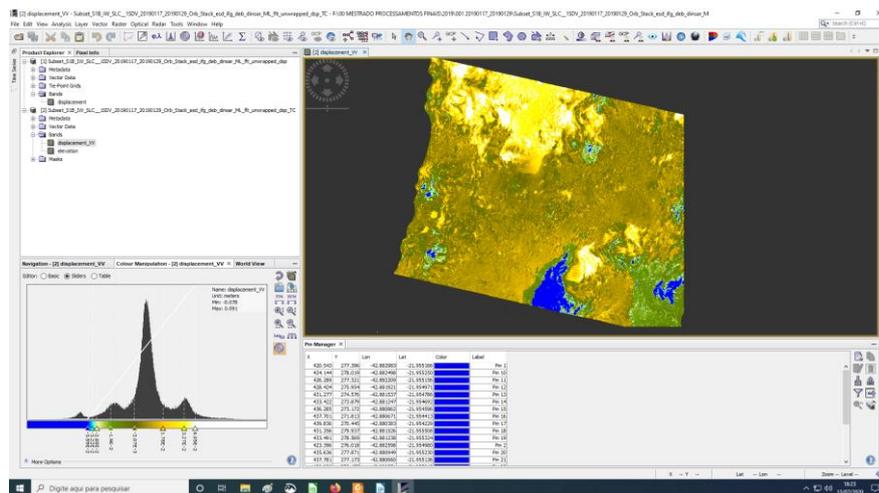


Figura 40 – Obtenção do mapa de deslocamento
Fonte: Autor, 2019.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho está localizada sobre o município de Além Paraíba-MG representada pela Figura 41. O município está localizado na região conhecida como Zona da Mata, situa-se a 140 m de altitude, às margens do Rio Paraíba do Sul, o qual o separa dos municípios de Carmo e Sapucaia, no Estado do Rio de Janeiro. Conta com aproximadamente 35.438 habitantes, tendo densidade demográfica de 67,30 habitantes por km². (IBGE, 2023).

(a) município de Sapucaia – RJ



(b) Barragem monitorada

Figura 41 - (a) Imagem do município de Além Paraíba-MG e (b) barragem monitorada
Fonte: Google Earth, 2023.

A escolha da barragem deu-se devido ao interesse da empresa proprietária da barragem e da existência de monitoramento por topografia que possibilitaria a comparação com os deslocamentos a serem obtidos por InSAR.

Trata-se de um dique, com construção finalizada em novembro de 2010, composto por espaldar de montante em solo compactado e de jusante em solo compactado e enrocamento. Na região central do corpo do maciço compactado previu-se a utilização de um material com elevado teor da fração argila. O dique apresenta altura máxima de aproximadamente 75,00m e crista na elevação 255,00m com largura de 7,00m. O espaldar de montante incorpora a ensecadeira de solo compactado com inclinação de 1,0(V):2,3(H) e a partir da elevação 244,50m apresenta proteção de enrocamento contra o efeito das ondas do reservatório, com talude de 1,0(V):1,50(H). O espaldar de jusante apresenta seção zoneada de solo compactado e enrocamento. A zona de enrocamento apresenta taludes de jusante de 1,0(V):2,0(H), com bermas de 15,00m e 16,00m de largura nas elevações 236,50m e 210,00m, respectivamente. O talude abaixo da elevação de 210,00m apresenta declividade de 1,0(V):1,5(H). A fundação do dique, no leito do córrego, dentro de uma faixa de aproximadamente 75m, é em topo rochoso, sendo nas ombreiras esquerda e direita em solo residual e/ou colúvio chegando a alcançar uma espessura nas ombreiras. A Figura 42 apresenta a planta do dique, as figuras 43 a 47 as seções longitudinal e transversais e a Figura 48, a legenda dos referidos desenhos de projeto.



Figura 42 - Projeto executivo do dique - Planta
 Fonte: Furnas, 2023

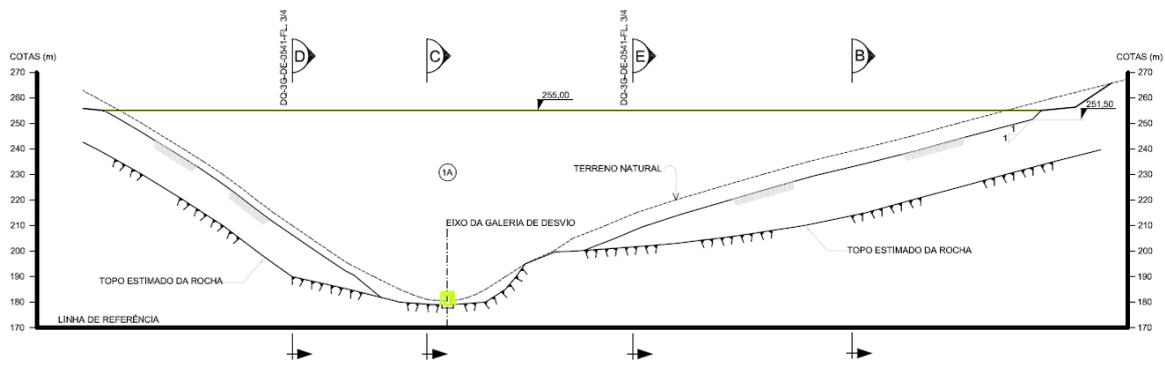


Figura 43 - Projeto executivo do dique – Seção longitudinal
 Fonte: Furnas, 2023

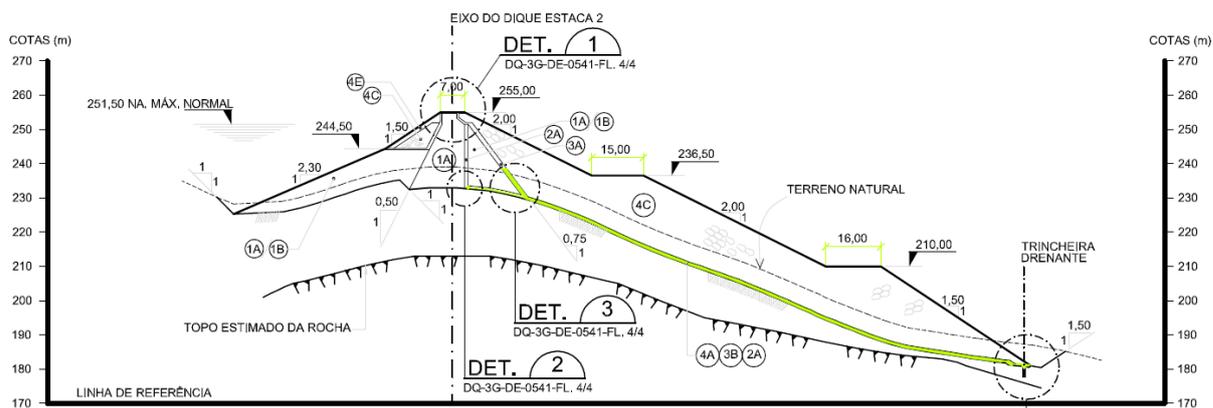


Figura 44 - Projeto executivo do dique – Seção transversal B
 Fonte: Furnas, 2023

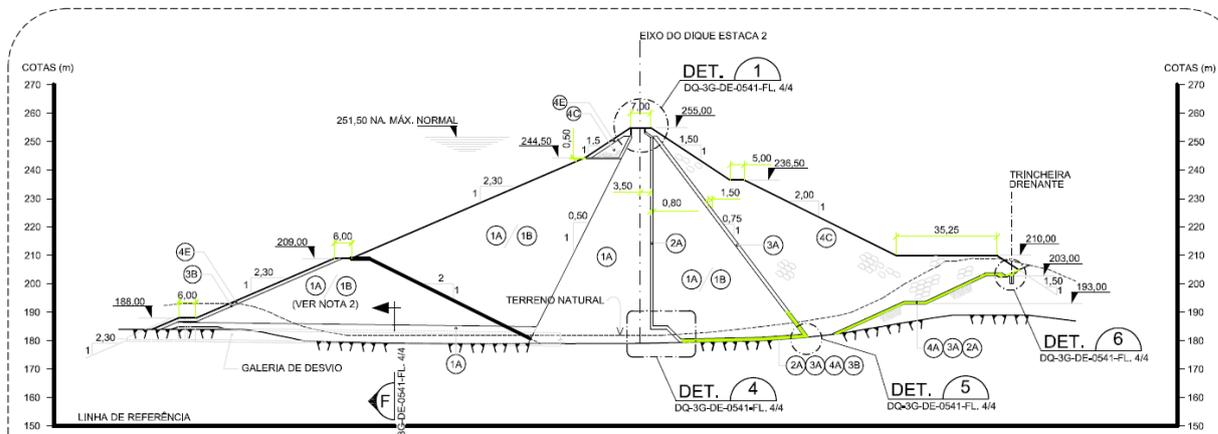


Figura 45 - Projeto executivo do dique – Seção transversal C
 Fonte: Furnas, 2023

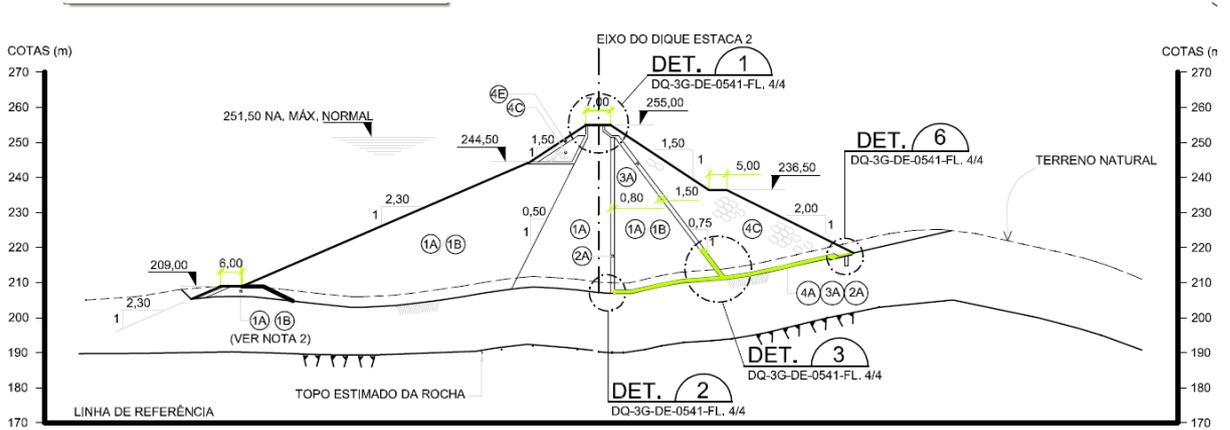


Figura 46 - Projeto executivo do dique – Seção transversal D
 Fonte: Furnas, 2023

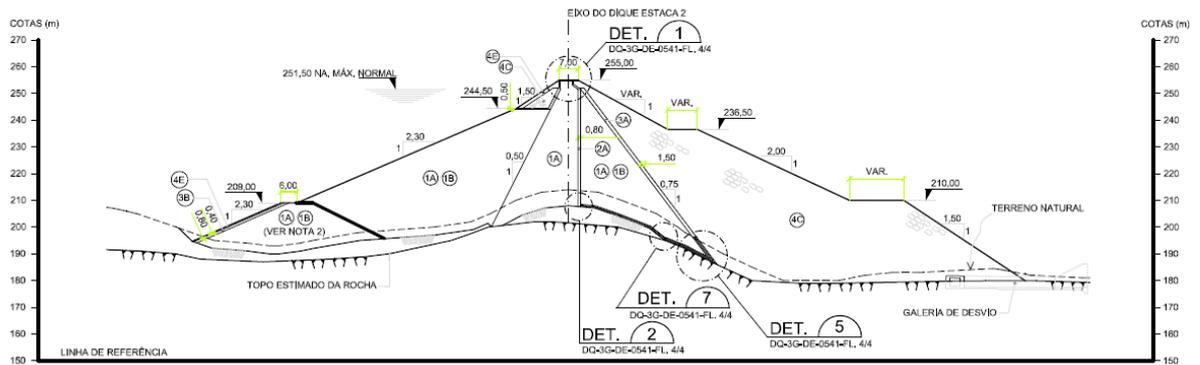


Figura 47 - Projeto executivo do dique – Seção transversal E
 Fonte: Furnas, 2023

- SOLO ESCAVADO
- TOPO ESTIMADO DA ROCHA
- (1A) SOLO COMPACTADO (SOLO COLLUVIONAR E/OU RESIDUAL MADURO DE GNAISSE, PROVENIENTE DAS ESCAVAÇÕES OBRIGATORIAS E/OU ÁREAS DE EMPRÉSTIMO).
- (1B) SOLO COMPACTADO (SOLO RESIDUAL JOVEM DE GNAISSE, PROVENIENTE DAS ESCAVAÇÕES OBRIGATORIAS E/OU ÁREAS DE EMPRÉSTIMO).
- (2A) FILTRO DE AREIA COMPACTADA (AREIA FINA A MÉDIA).
- (3A) TRANSIÇÃO FINA COMPACTADA (MATERIAL BRITADO - DIÂMETRO MÁXIMO \leq 12,7 mm).
- (3B) TRANSIÇÃO MÉDIA COMPACTADA (MATERIAL BRITADO - DIÂMETRO MÁXIMO \leq 19 mm).
- (3E) TRANSIÇÃO AMPLA COMPACTADA
- (4A) ENROCAMENTO FINO COMPACTADO, SELECIONADO A PARTIR DA ROCHA, PROVENIENTE DAS ESCAVAÇÕES EXIGIDAS (DIÂMETRO MÁXIMO \leq 150 mm).
- (4C) ENROCAMENTO COMPACTADO.
- (4E) ENROCAMENTO ARRUMADO DE PROTEÇÃO (RIP-RAP).

Figura 48 - Legenda dos desenhos das seções transversais e longitudinal do dique

Para possibilitar a comparação entre as informações de deslocamentos geradas pela técnica InSAR e o nivelamento geométrico, o projeto executivo foi georreferenciado sobre a imagem ótica, possibilitando a obtenção das coordenadas dos marcos superficiais existentes (Figuras 49 e 50).

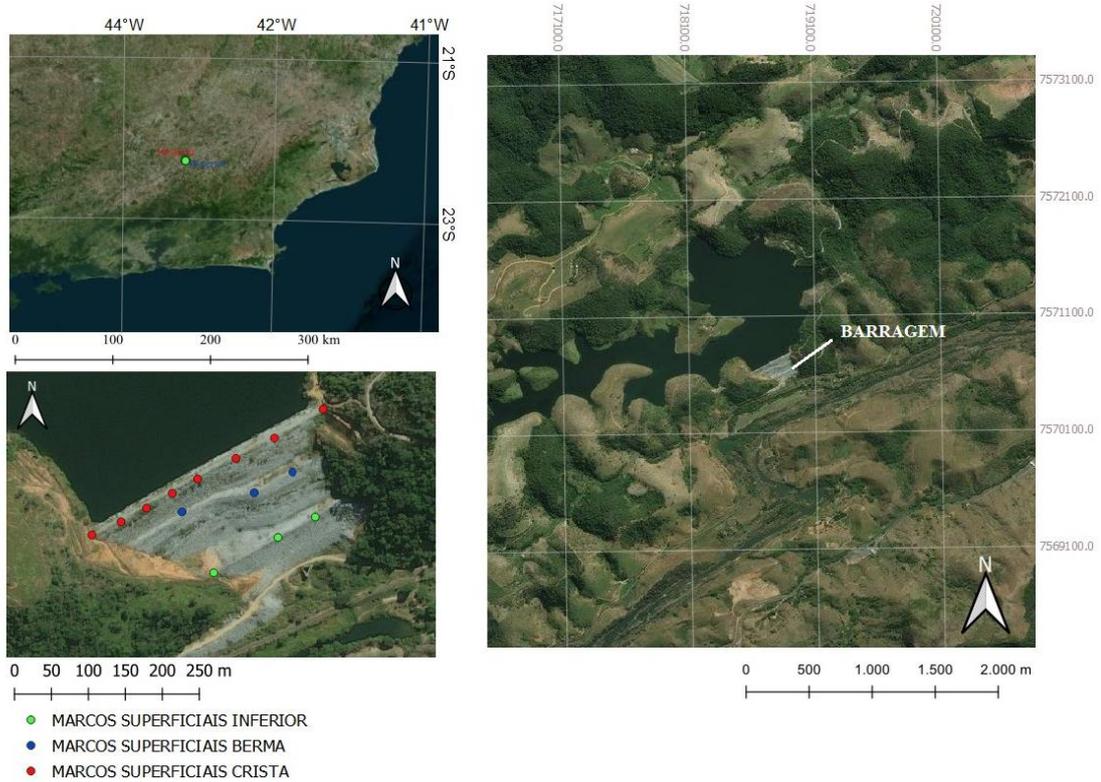


Figura 49 - Localização da área e pontos de interesse
Fonte: Autor, 2019

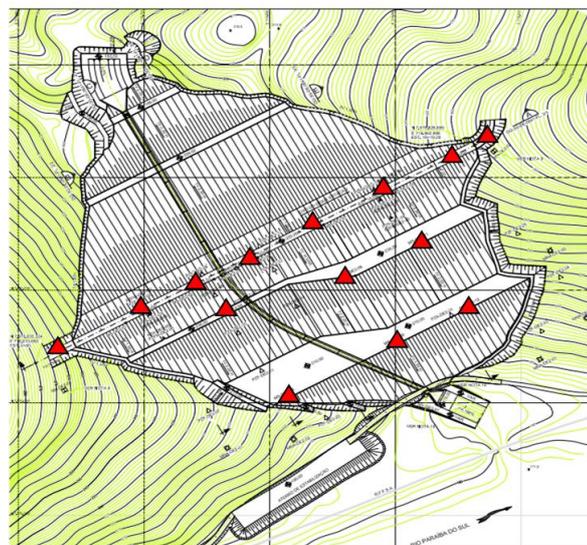


Figura 50 - Localização dos marcos superficiais (triângulos vermelhos)
Fonte: Autor, 2023

A Figura 51 mostra os marcos superficiais instalados (dimensões: 1,0mx1,0m) e a Tabela 8 apresenta as informações de coordenadas dos marcos superficiais extraídas das imagens georreferenciadas. Considerando o tamanho do pixel (5,0mx20,0m) e dos marcos superficiais, bem como suas respectivas posições no terreno, pode-se dizer que os mesmos estão em pixels diferentes.

a) MS-DE02-06



b) MS-DE02-02



Figura 51 - Marcos superficiais da barragem.
Fonte: Autor, 2023

Tabela 8 - Coordenadas dos pontos de interesse

PONTO	LONG	LAT	LOCALIZAÇÃO
MS-DE2-04	-42,8822	-21,9552	BERMA 1
MS-DE2-08	-42,8819	-21,9550	
MS-DE2-11	-42,8815	-21,9548	
RN-DE2-01	-42,8830	-21,9552	CRISTA
MS-DE2-01	-42,8826	-21,9550	
MS-DE2-02	-42,8822	-21,9548	
MS-DE2-03	-42,8819	-21,9546	
MS-DE2-06	-42,8816	-21,9544	
MS-DE2-07	-42,8813	-21,9543	
MS-DE2-10	-42,8811	-21,9541	
RN-DE2-02	-42,8807	-21,9540	
MS-DE2-05	-42,8812	-21,9547	BERMA 2
MS-DE2-09	-42,8809	-21,9546	
MS-DE2-12	-42,8804	-21,9542	

Fonte: Autor, 2023

5. RESULTADOS E ANÁLISES DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA INSAR.

5.1. Geração dos pares interferométricos.

O resultado dos valores de linha de base perpendicular e temporal, entre as 30 imagens, foram extraídos da combinação entre uma imagem mestre por ano avaliado, neste caso utilizou-se as imagens mais recentes relativas a cada ano (jun/2017, jan/2018 e jan/2019) e as demais classificadas como escravas.

A Tabela 9 apresenta os valores de linha de base perpendicular e temporal, dentre os 30 pares, 3 apresentam a linha de base temporal mínima de 12 dias e a máxima de 336 dias. O menor valor de linha de base perpendicular encontrado foi de 0,67 m e o máximo de 105,72 m. Observa-se na primeira coluna que o nome de cada produto é constituído de duas datas (formato de data: ano, seguido de mês e dia) referentes ao respectivo par interferométrico, sendo a da esquerda a data da imagem mestre e a da direita a da imagem escrava. Portanto, cada um do par interferométrico se refere a um mês entre julho de 2017 e dezembro de 2019.

Tabela 9 - Composição de pares interferométricos e linhas de base perpendicular e temporal

PRODUTO (Par Interferométrico)	LINHA DE BASE PERPENDICULAR	LINHA DE BASE TEMPORAL
20170714_20170714	0,00	0,00
20170714_20170726	-71,09	-12,00
20170714_20170807	-66,93	-24,00
20170714_20170912	8,03	-60,00
20170714_20171030	14,32	-108,00
20170714_20171111	-22,48	-120,00
20170714_20171217	-87,31	-156,00
20180110_20180110	0,00	0,00
20180110_20180122	0,67	-12,00
20180110_20180203	-43,05	-24,00
20180110_20180311	-64,69	-60,00
20180110_20180404	13,46	-84,00
20180110_20180510	-7,79	-120,00
20180110_20180615	-82,29	-156,00
20180110_20180709	-43,43	-180,00
20180110_20180814	-90,22	-216,00
20180110_20180919	-9,20	-252,00

Tabela 9 - Composição de pares interferométricos e linhas de base perpendicular e temporal (continuação)

PRODUTO	LINHA DE BASE	LINHA DE BASE
20180110_20181001	40,33	-264,00
20180110_20181118	18,98	-312,00
20180110_20181212	-49,07	-336,00
20190117_20190117	0,00	0,00
20190117_20190129	43,96	-12,00
20190117_20190222	82,19	-36,00
20190117_20190318	-32,13	-60,00
20190117_20190411	66,64	-84,00
20190117_20190517	24,11	-120,00
20190117_20190610	22,49	-144,00
20190117_20190716	-17,93	-180,00
20190117_20190821	78,95	-216,00
20190117_20190914	25,56	-240,00
20190117_20191020	105,72	-276,00
20190117_20191113	20,82	-300,00
20190117_20191219	60,79	-336,00

Fonte: Autor, 2023

As linhas de base entre imagens do mesmo par interferométrico determinam a sensibilidade do interferograma à topografia local e influenciam a coerência do interferograma.

No caso da aplicação da técnica InSAR nos estudos de deformação do solo, as linhas de base devem ser as menores possíveis, sendo ideal, valores próximos de zero, o que significaria que as órbitas das duas passagens do satélite seriam exatamente idênticas, e a sensibilidade da técnica à topografia do terreno seria nula, além de minimizar as mudanças nas feições do terreno imageado.

5.2. Resultados da estimativa de coerência

Os fatores que influenciam na determinação do índice de coerência em pares interferométricos descritos no item 2.3.5(c) estão, em sua maioria, presentes na região de estudo, pois trata-se de uma região com cobertura vegetal densa, a proximidade do talude com massas d'água, além de apresentar variações pluviométricas e de umidade.

As tabelas 10, 11 e 12 revelam valores compreendidos entre 0,12 e 0,91, considerando os pontos de interesse eleitos (pixels onde estão localizados os respectivos marcos superficiais). Nas tabelas, os valores hachurados na cor amarela representam a

classificação “boa” e os valores hachurados em verde, representam a classificação “excelente” (Tabela 5 – Capítulo 2).

Os mapas de coerência gerados pelo processamento para cada par interferométrico de 2017 a 2019 envolvendo toda a área de estudo e adjacências, representados matricialmente, estão apresentadas nas figuras 52 a 56, com valores em escala de cinza.

Tabela 10 – Valores de Coerência dos Pares Interferométricos – 2017
(em amarelo: qualidade boa; em verde: qualidade excelente)

COERÊNCIA – 2017							
LOCAL	MARCO SUPERFICIAL	PARES INTERFEROMÉTRICOS					
		14Jul2017 26Jul2017	14Jul2017 07Ago2017	14Jul2017 12Set2017	14Jul2017 30Out2017	14Jul2017 11Nov2017	14Jul2017 12Dez2017
CRISTA	RN-DE2-01	0,39	0,45	0,51	0,51	0,36	0,39
	MS-DE2-01	0,34	0,33	0,46	0,48	0,44	0,47
	MS-DE2-02	0,33	0,51	0,44	0,14	0,21	0,54
	MS-DE2-03	0,35	0,47	0,22	0,15	0,20	0,27
	MS-DE2-06	0,34	0,32	0,20	0,21	0,16	0,28
	MS-DE2-07	0,18	0,21	0,33	0,24	0,22	0,36
	MS-DE2-10	0,32	0,50	0,52	0,44	0,58	0,53
	RN-DE2-02	0,37	0,33	0,26	0,28	0,26	0,35
BERMA INTERM	MS-DE2-04	0,31	0,63	0,53	0,38	0,40	0,61
	MS-DE2-08	0,66	0,56	0,60	0,81	0,78	0,72
	MS-DE2-11	0,46	0,45	0,53	0,71	0,75	0,50
BERMA INFERIOR	MS-DE2-05	0,50	0,58	0,52	0,64	0,67	0,61
	MS-DE2-09	0,63	0,47	0,59	0,77	0,77	0,56
	MS-DE2-12	0,49	0,33	0,52	0,82	0,55	0,42

Fonte: Autor, 2023

Tabela 11 - Valores de Coerência – 2018
(em amarelo: qualidade boa; em verde: qualidade excelente)

COERÊNCIA – 2018													
LOCAL	MARCO SUPERFICIAL	PARES INTERFEROMÉTRICOS											
		20180110 20180122	20180110 20180203	20180110 20180311	20180110 20180404	20180110 20180510	20180110 20180615	20180110 20180709	20180110 20180814	20180110 20180919	20180110 20181001	20180110 20181118	20180110 20181212
CRISTA	RN-DE2-01	0,47	0,66	0,32	0,41	0,37	0,30	0,23	0,35	0,43	0,34	0,42	0,35
	MS-DE2-01	0,42	0,51	0,32	0,44	0,51	0,25	0,28	0,29	0,56	0,45	0,30	0,42
	MS-DE2-02	0,36	0,54	0,29	0,19	0,30	0,14	0,39	0,44	0,37	0,24	0,25	0,44
	MS-DE2-03	0,48	0,49	0,26	0,45	0,35	0,18	0,17	0,33	0,33	0,25	0,14	0,48
	MS-DE2-06	0,30	0,61	0,16	0,27	0,44	0,17	0,13	0,29	0,30	0,32	0,32	0,45
	MS-DE2-07	0,44	0,53	0,24	0,32	0,59	0,24	0,36	0,28	0,41	0,52	0,17	0,56
	MS-DE2-10	0,79	0,38	0,57	0,44	0,75	0,27	0,56	0,61	0,46	0,47	0,48	0,66
	RN-DE2-02	0,46	0,64	0,22	0,29	0,35	0,37	0,27	0,18	0,40	0,35	0,18	0,28
BERMA INTERM	MS-DE2-04	0,65	0,36	0,58	0,55	0,70	0,44	0,37	0,48	0,55	0,63	0,21	0,55
	MS-DE2-08	0,76	0,38	0,72	0,60	0,78	0,82	0,78	0,74	0,61	0,71	0,81	0,70
	MS-DE2-11	0,79	0,32	0,38	0,45	0,75	0,71	0,66	0,72	0,51	0,61	0,63	0,69
BERMA INFERIOR	MS-DE2-05	0,77	0,42	0,41	0,34	0,65	0,74	0,46	0,63	0,35	0,60	0,72	0,60
	MS-DE2-09	0,79	0,69	0,53	0,49	0,70	0,79	0,77	0,75	0,54	0,69	0,87	0,77
	MS-DE2-12	0,83	0,51	0,48	0,48	0,75	0,77	0,75	0,74	0,53	0,70	0,82	0,74

Fonte: Autor, 2023

Tabela 12 - Valores de Coerência – 2019
(em amarelo: qualidade boa; em verde: qualidade excelente)

COERÊNCIA – 2019													
LOCAL	MARCO SUPERFICIAL	PARES INTERFEROMÉTRICOS											
		20190117 20190129	20190117 20190222	20190117 20190318	20190117 20190411	20190117 20190517	20190117 20190610	20190117 20190716	20190117 20190821	20190117 20190914	20190117 20191020	20190117 20191113	20190117 20191219
CRISTA	RN-DE2-01	0,44	0,34	0,33	0,31	0,29	0,57	0,24	0,32	0,31	0,26	0,27	0,39
	MS-DE2-01	0,51	0,29	0,36	0,33	0,49	0,27	0,35	0,28	0,44	0,28	0,27	0,35
	MS-DE2-02	0,38	0,14	0,24	0,18	0,23	0,31	0,18	0,13	0,44	0,27	0,13	0,22
	MS-DE2-03	0,38	0,16	0,31	0,19	0,28	0,32	0,22	0,12	0,24	0,20	0,19	0,25
	MS-DE2-06	0,60	0,15	0,29	0,20	0,29	0,35	0,30	0,28	0,26	0,23	0,16	0,40
	MS-DE2-07	0,68	0,28	0,39	0,49	0,56	0,21	0,44	0,45	0,52	0,39	0,31	0,43
	MS-DE2-10	0,86	0,52	0,58	0,75	0,68	0,46	0,76	0,73	0,81	0,70	0,60	0,56
	RN-DE2-02	0,53	0,42	0,46	0,41	0,43	0,28	0,46	0,39	0,40	0,44	0,31	0,17
BERMA INTERM	MS-DE2-04	0,70	0,24	0,20	0,30	0,21	0,34	0,26	0,41	0,54	0,29	0,17	0,45
	MS-DE2-08	0,85	0,59	0,46	0,58	0,46	0,73	0,75	0,56	0,71	0,60	0,47	0,40
	MS-DE2-11	0,89	0,70	0,53	0,63	0,58	0,79	0,84	0,73	0,84	0,68	0,56	0,55
BERMA INFERIOR	MS-DE2-05	0,77	0,44	0,38	0,64	0,45	0,55	0,70	0,67	0,72	0,68	0,39	0,41
	MS-DE2-09	0,89	0,47	0,41	0,66	0,44	0,57	0,74	0,68	0,84	0,75	0,41	0,39
	MS-DE2-12	0,91	0,31	0,47	0,60	0,41	0,65	0,77	0,69	0,87	0,75	0,45	0,48

Fonte: Autor, 2023

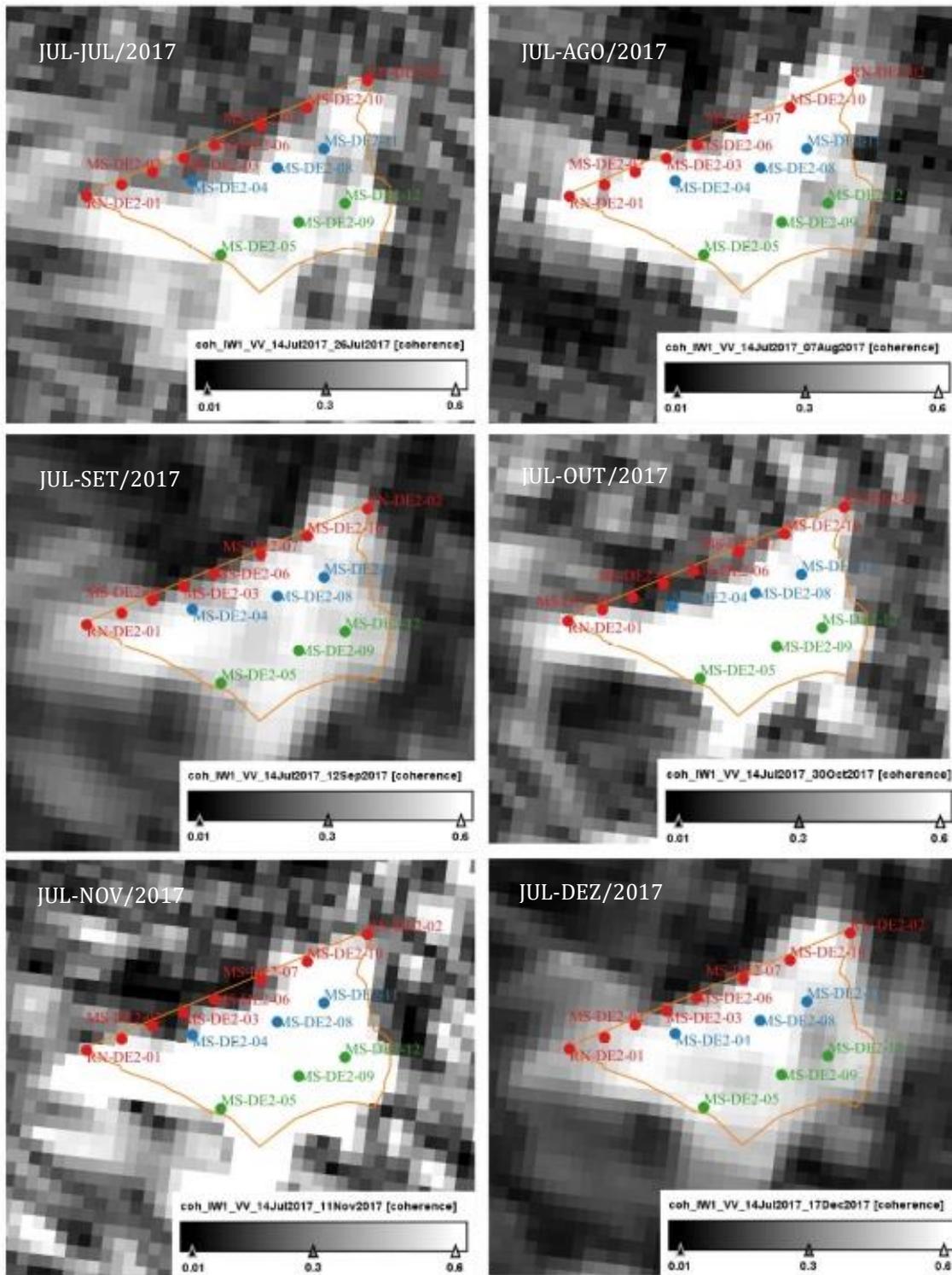


Figura 52 - Resultado matricial da Coerência no segundo semestre de 2017
 Fonte: Autor, 2023

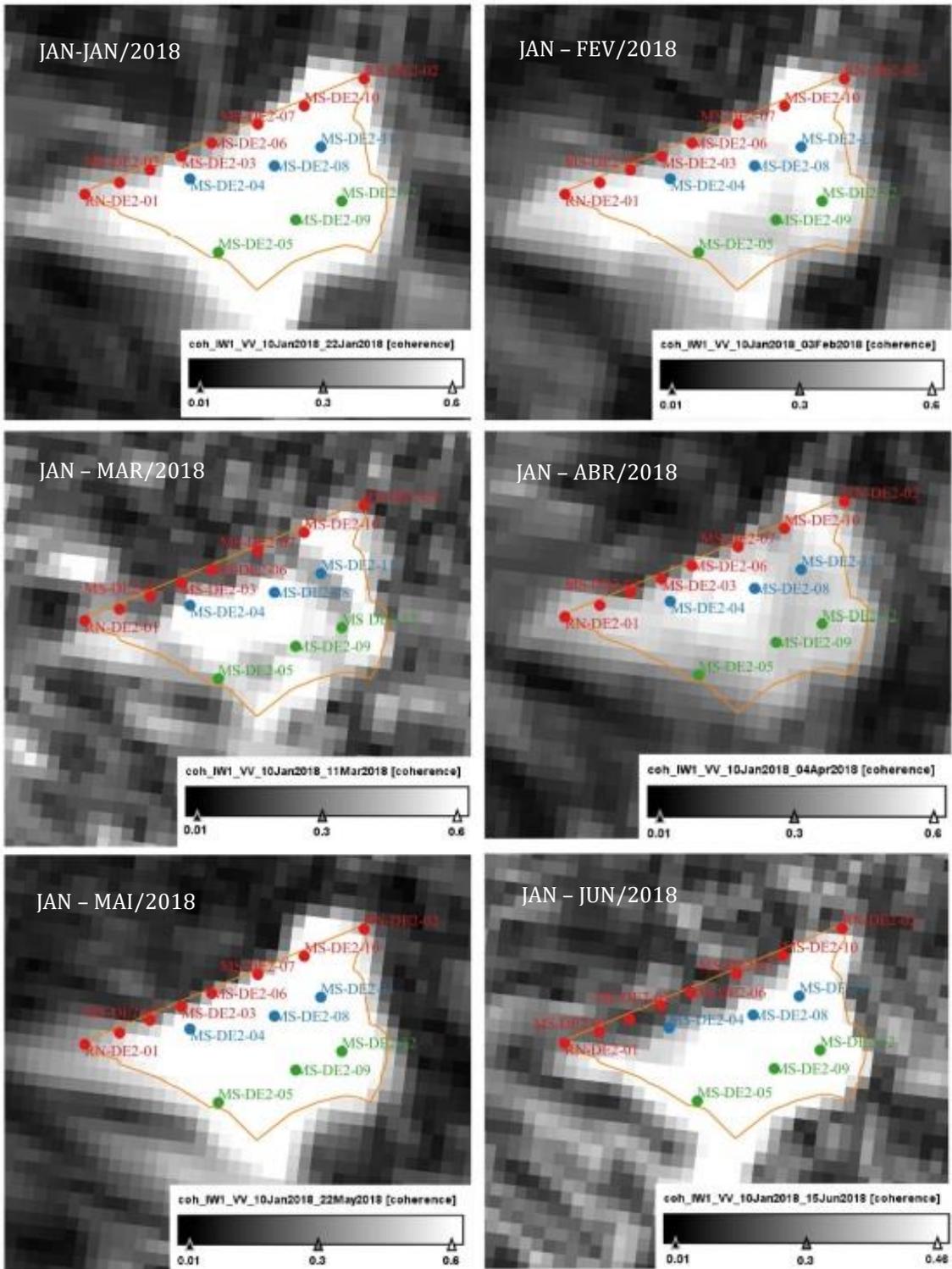


Figura 53 - Resultado matricial da Coerência no primeiro semestre de 2018

Fonte: Autor, 2023

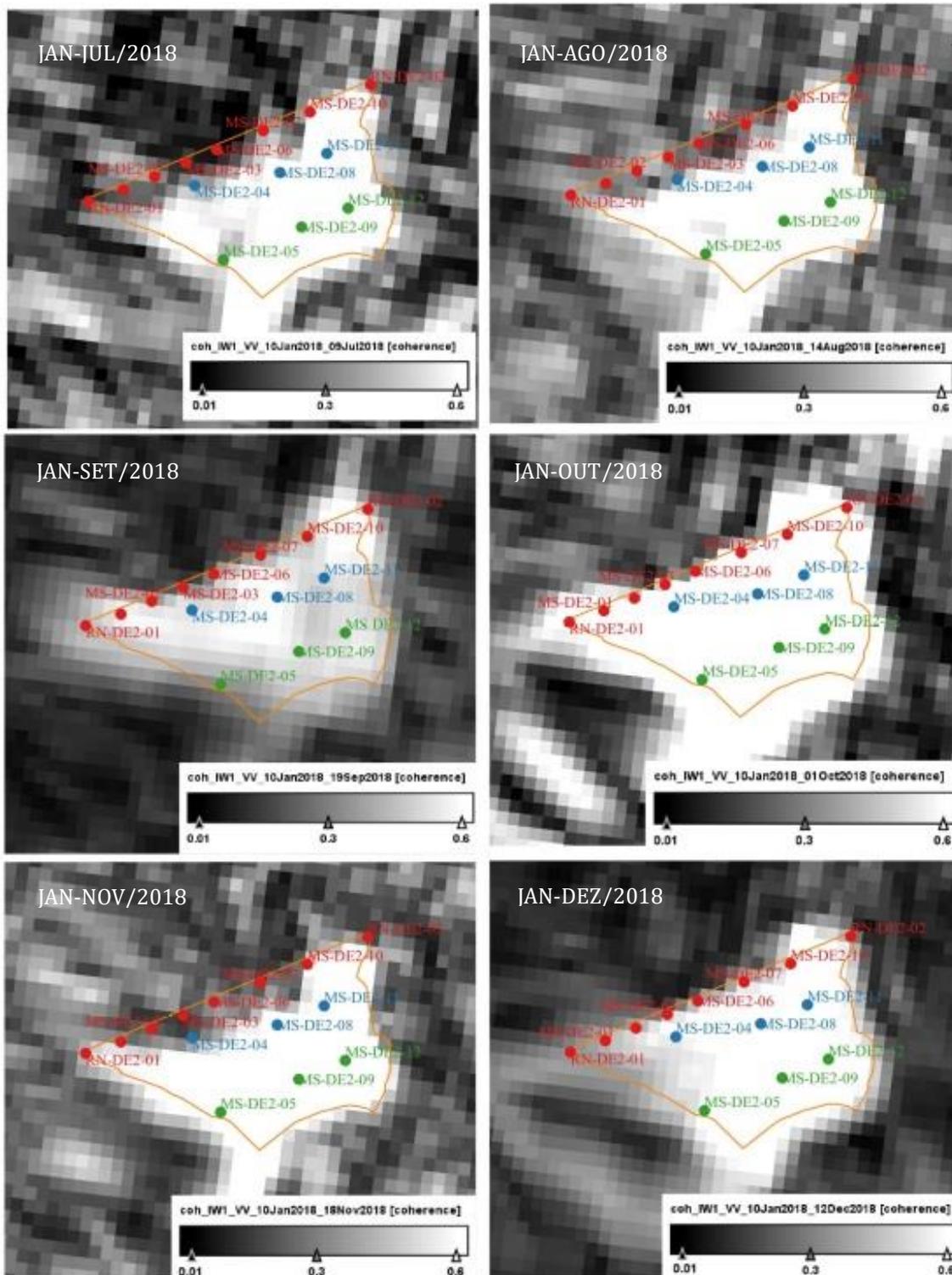


Figura 54 - Resultado matricial da Coerência segundo semestre de 2018
 Fonte: Autor, 2023

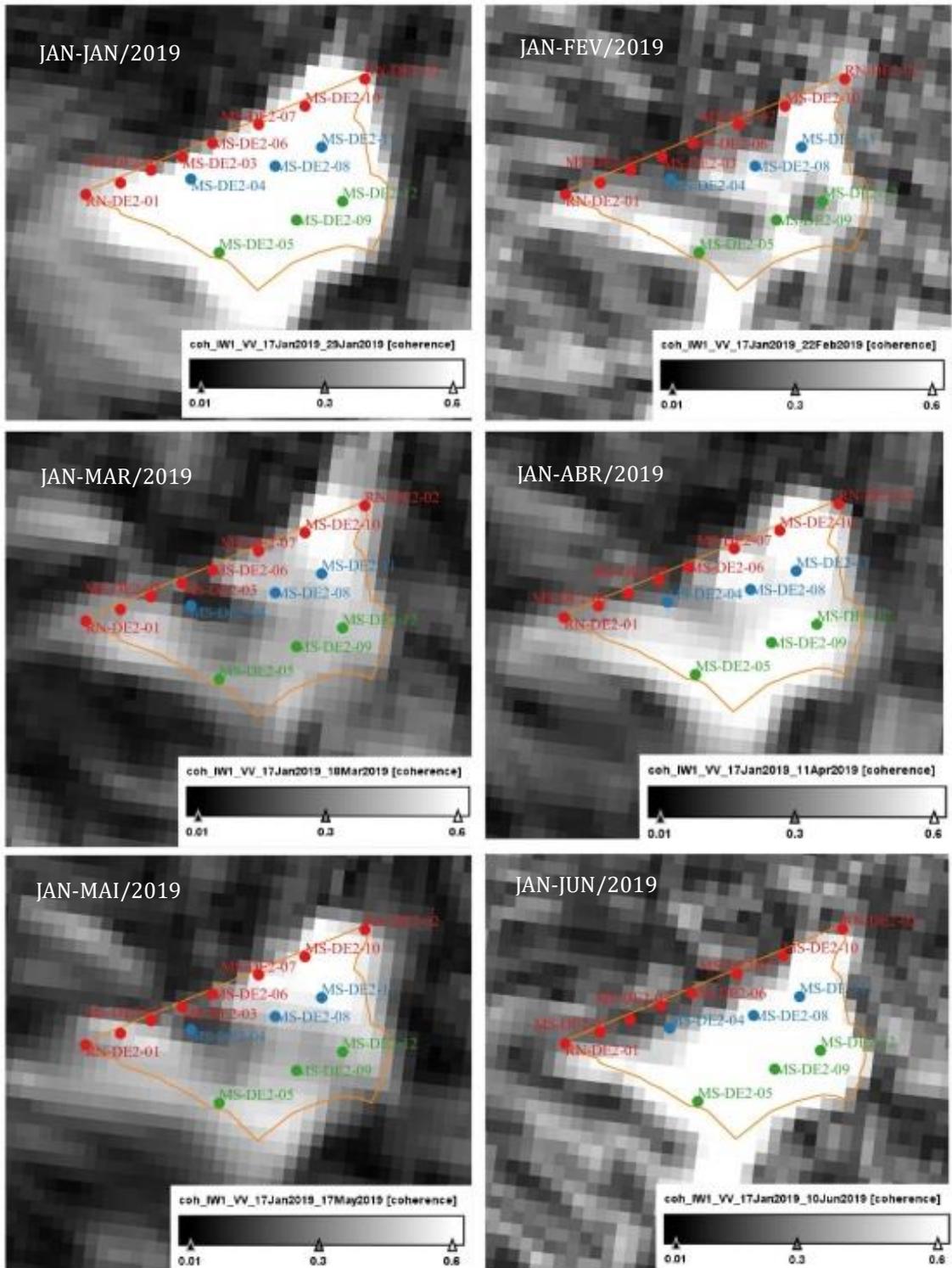


Figura 55 - Resultado matricial da Coerência primeiro semestre de 2019
 Fonte: Autor, 2023

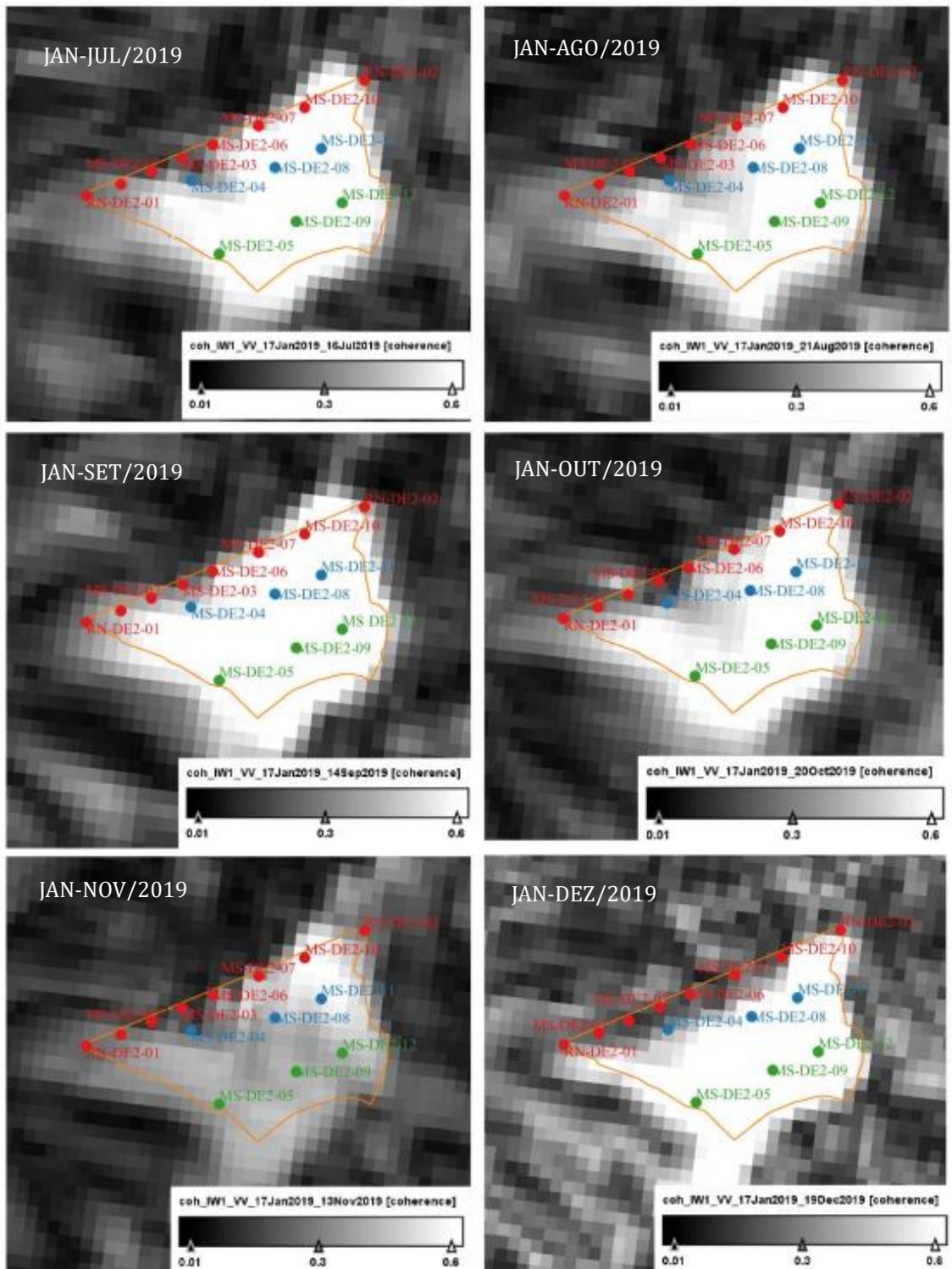


Figura 56 - Resultado matricial da Coerência segundo semestre de 2019
 Fonte: Autor, 2023

Os marcos superficiais MS-DE2-01, MS-DE2-02, MS-DE2-03, MS-DE2-06, MS-DE2-07 e MS-DE2-10, existentes na crista da barragem, mais próximos da massa d'água, apresentaram valores mais baixos de coerência (Figura 57). Estes resultados são compatíveis com o estudo realizado por Amani (2021), Patrício (2018), Corsetti et al (2018) e Negrão et al (2018) que ao desenvolverem suas pesquisas sobre as potencialidades do uso da informação de coerência, ratificou a interferência de corpos d'água e vegetação sobre os alvos de interesse, fazendo com que os valores coerência sejam mais baixos.



Figura 57 - Disposição dos marcos superficiais e feições do terreno da área de interesse
Fonte: Autor, 2023.

A análise dos resultados de coerência obtidos confirma, portanto, o comportamento esperado na aplicação da interferometria SAR. A possibilidade de interferência do sinal na interação entre os pontos de interesse, a lâmina d'água e a vegetação, principalmente os pontos localizados na crista da barragem, apresentaram menores valores de coerência, enquanto os pontos localizados nas bermas obtiveram maiores valores. A Figura 58 demonstra a ocorrência percentual dos valores de coerência nos pares interferométricos analisados.

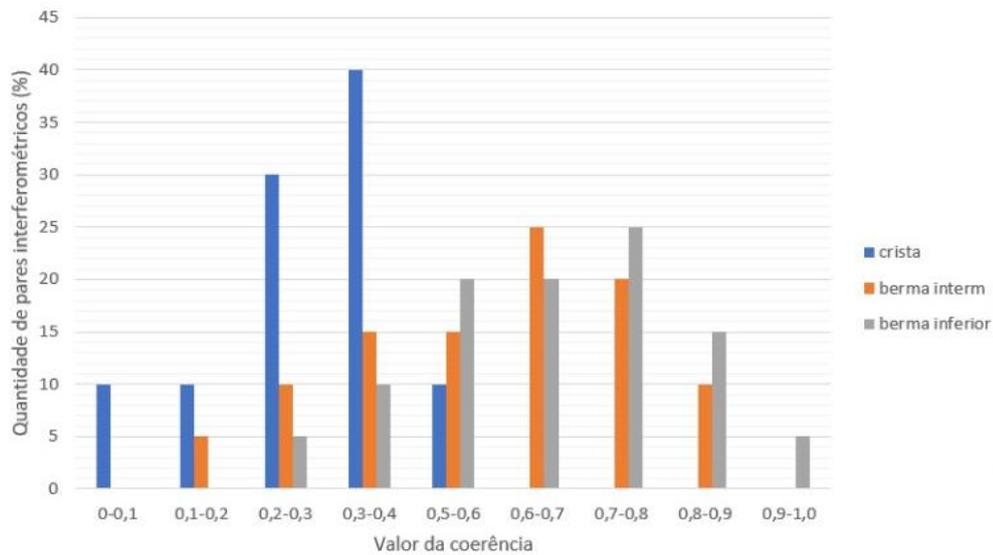


Figura 58 - Ocorrência dos valores de coerência por regiões dos marcos superficiais.
Fonte: Autor, 2023

Considerando, complementarmente, que a amplitude do sinal de fase do interferograma pode variar significativamente mesmo nos casos ideais de inexistência de decorrelações espaço-temporais, o ruído de fase pode mudar de um pixel para outro. Pixels com retornos de sinal com intensidades mais elevadas apresentam fases estáveis enquanto os alvos tidos como espalhadores instáveis indicam fases interferométricas mais difusas (HANSSSEN, 2001). Esta característica pode explicar as variações na estimativa de coerência nos marcos superficiais, MS-DE2-04, MS-DE2-08, MS-DE2-11, MS-DE2-05, MS-DE2-09, e MS-DE2-12, encontrados nas bermas da barragem, uma vez que, embora mais distantes de elementos espalhadores instáveis, vegetação e massa d'água, apresentaram diferenças na estimativa de coerência no mesmo par.

É observado uma possível influência da umidade relativa do ar no momento da aquisição das imagens. Silva (2009) afirma que existem alterações nas propriedades dielétricas dos elementos presentes na superfície imageada, quando expostas a diferentes índices de umidade relativa do ar. Os dados relativos à 2017 (Figuras 59 e 60) demonstram que existem valores mais baixos de coerência quando os índices de umidade relativa apurados nas datas do imageamento são mais elevados, indicando o comportamento relativo às coerências, entretanto, este comportamento não ecoa em todos os marcos, o que não permite o enquadramento de todos na premissa geral (umidade maior x coerência menor).

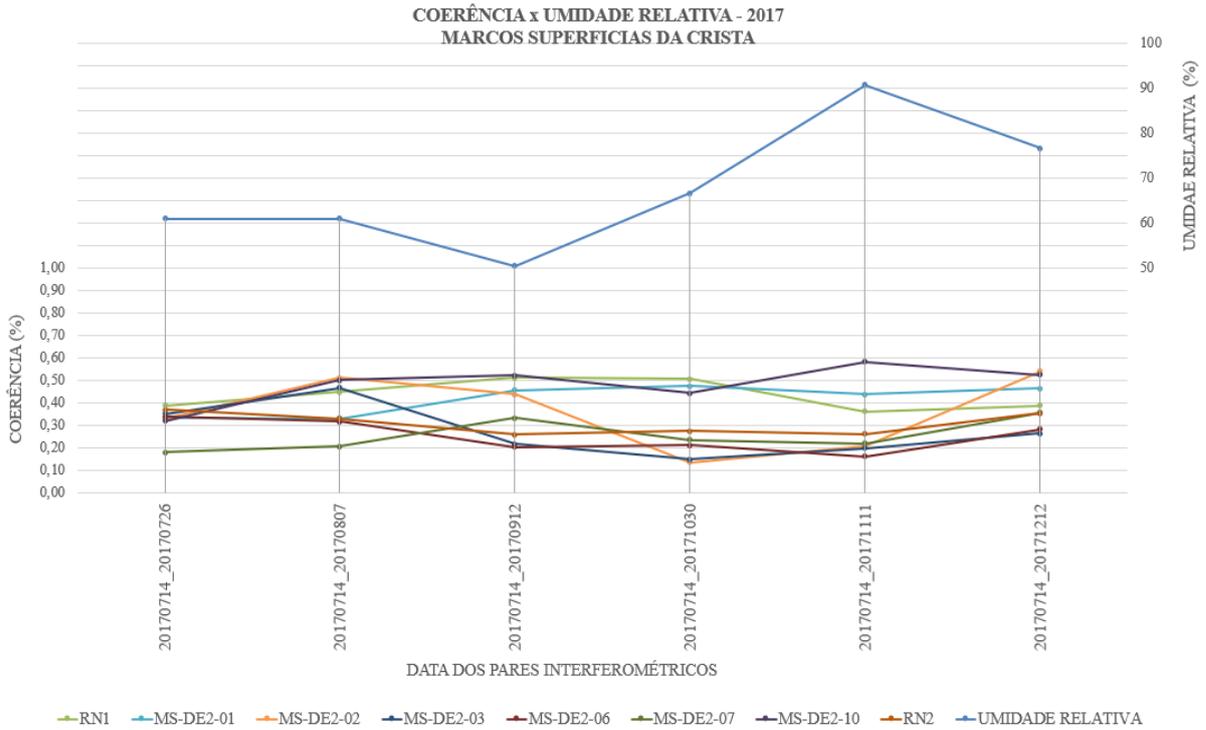


Figura 59 - Coerência versus Umidade Relativa 2017 – Crista
Fonte: Autor, 2023

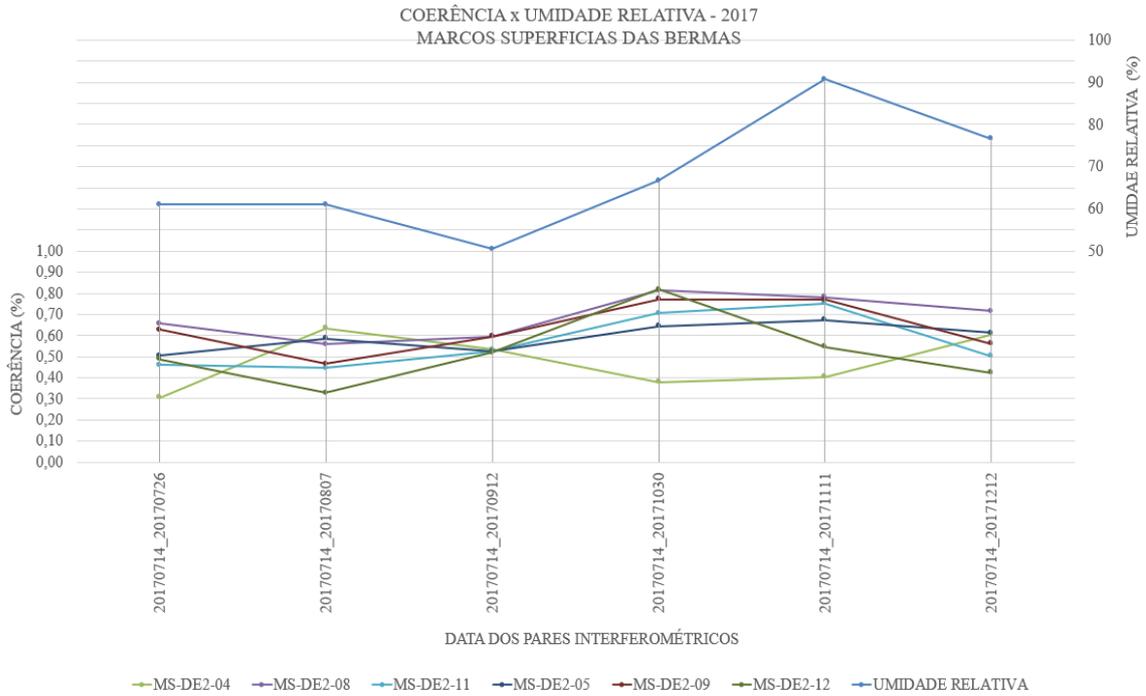


Figura 60 - Coerência versus Umidade Relativa 2017 – Bermas intermediária e inferior
Fonte: Autor, 2023

5.3. Resultados dos deslocamentos

Os resultados de deslocamentos apurados nos anos de 2017, 2018 e 2019 para cada pixel que constitui toda a área de estudo e adjacências, são apresentados nas figuras 61, 62 e 63. Para fins de análise da metodologia InSAR, os valores do deslocamento correspondem aos pixels onde encontram-se cada marco superficial monitorado.

Foram encontrados, neste conjunto específico de pixels, deslocamentos com amplitudes máximas em 2017 de -0,0276m a +0,0543m, no período de julho a dezembro, de -0,0562m a +0,0927m em 2018, de janeiro a dezembro e de -0,1563m a 0,0430m em 2019, de janeiro a dezembro. Valores negativos significam recalques e valores positivos soerguimento.

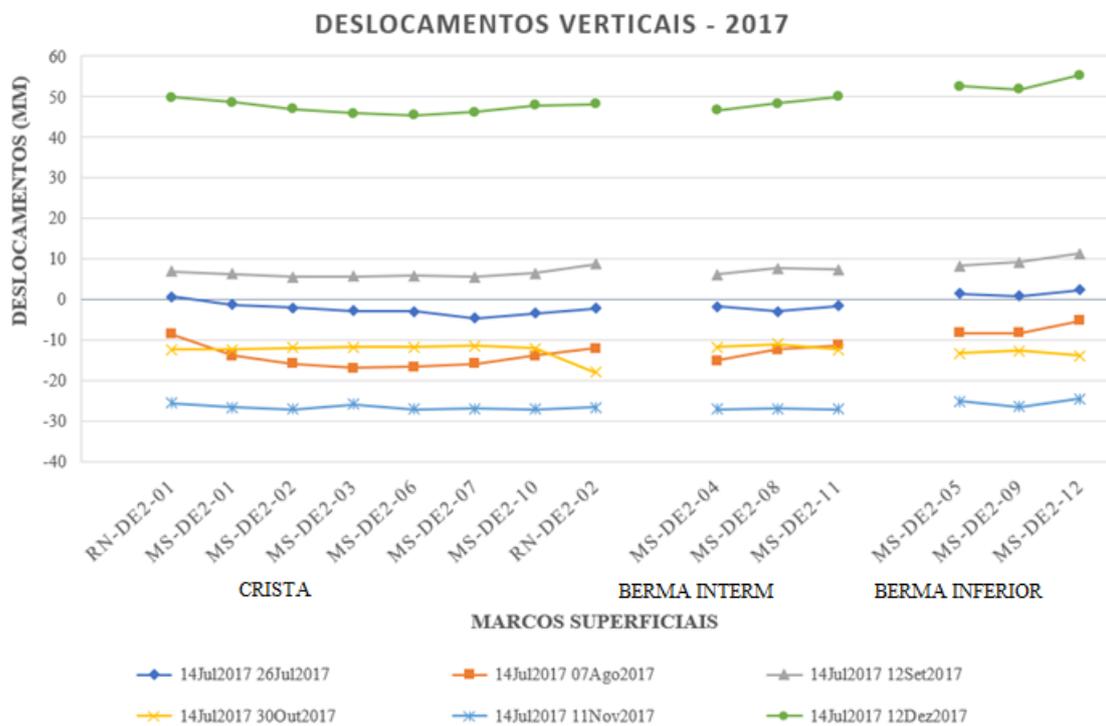


Figura 61 - Deslocamentos verticais absolutos em 2017
Fonte: Autor, 2023

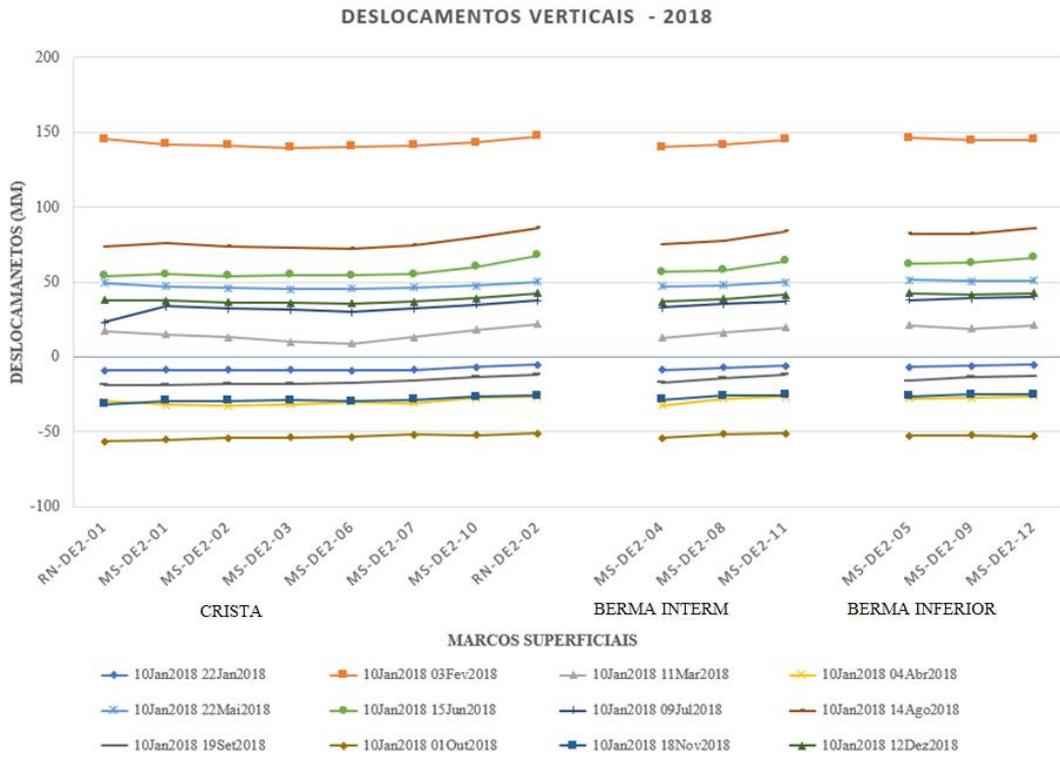


Figura 62 - Deslocamentos verticais absolutos em 2018
Fonte: Autor, 2023

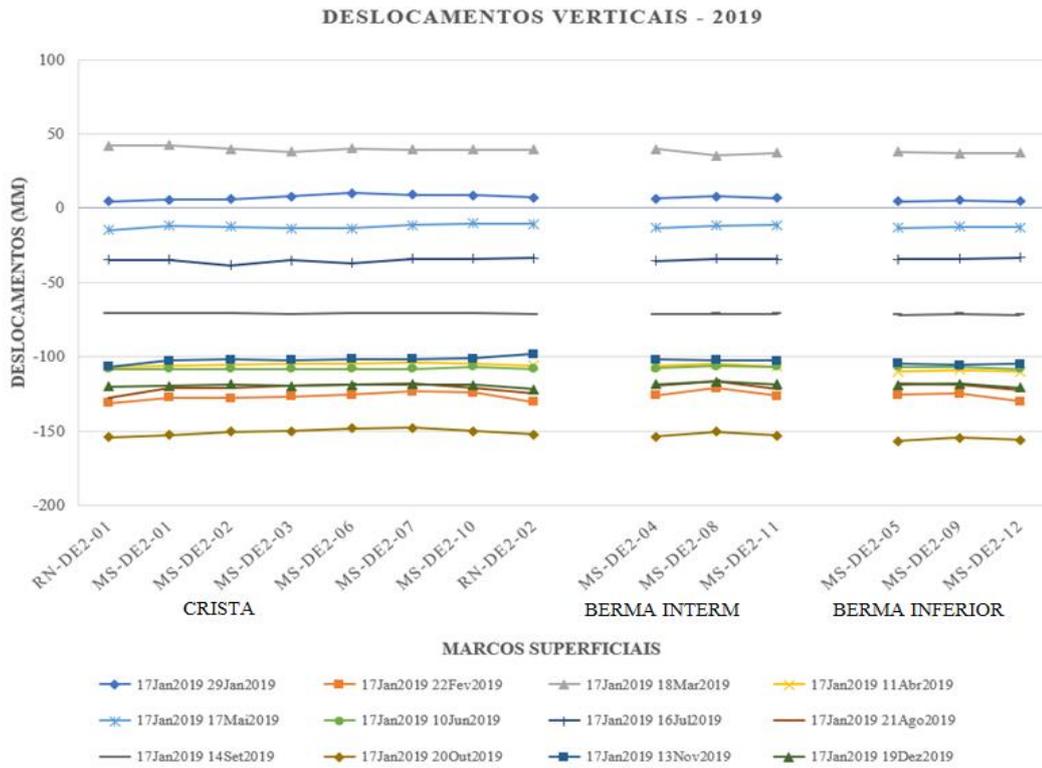


Figura 63 - Deslocamentos verticais absolutos em 2019
Fonte: Autor, 2023

A interpolação entre os dados representa a formação das superfícies de deslocamentos da crista e das bermas existentes na barragem, não sendo encontrados valores abruptos na plotagem destas superfícies.

Uma consideração importante sobre os deslocamentos é que, para barragens, podem existir movimentos horizontais e verticais (HUNTER, 2003). Entretanto não é possível conhecer a direção completa do deslocamento, posto que, conforme já abordado, as imagens obtidas no presente trabalho apresentam a limitação de terem sido tomadas somente no sentido de órbita descendente, impedindo, portanto, a decomposição da direção dos deslocamentos. Outro aspecto relevante é o fato do MDE (SRTM) considerado no processamento poder influenciar na determinação das elevações, o que explica a variação posicional no eixo dos deslocamentos.

As figuras 64 a 68 apresentam mapas matriciais de deslocamentos absolutos da área avaliada, quantificados pela escala gráfica mantida na forma original, já que os deslocamentos absolutos estão contidos numa faixa ampla de valores, sendo cada uma das figuras referente a um semestre.

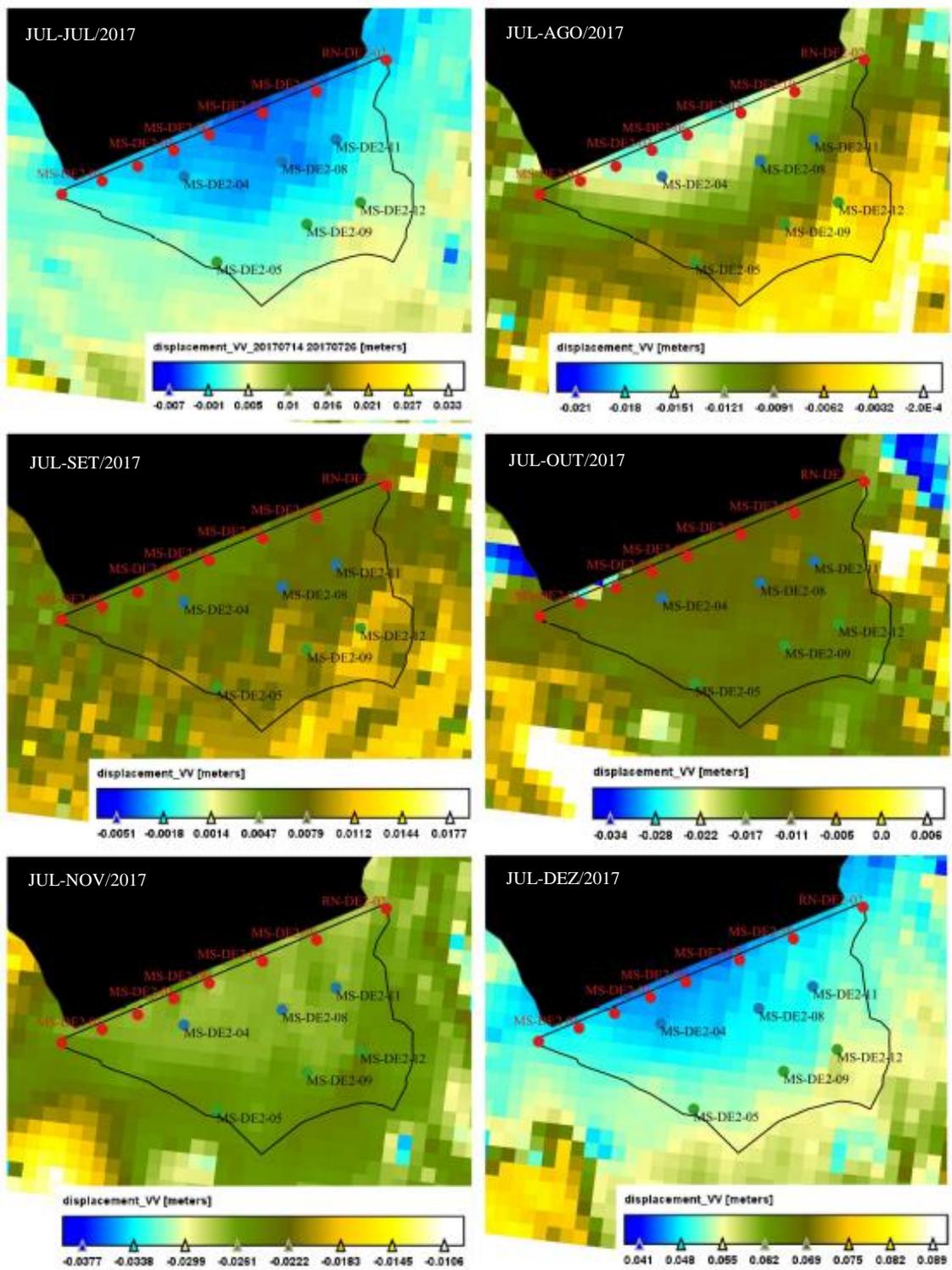


Figura 64 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no primeiro semestre de 2017
 Fonte: Autor, 2023

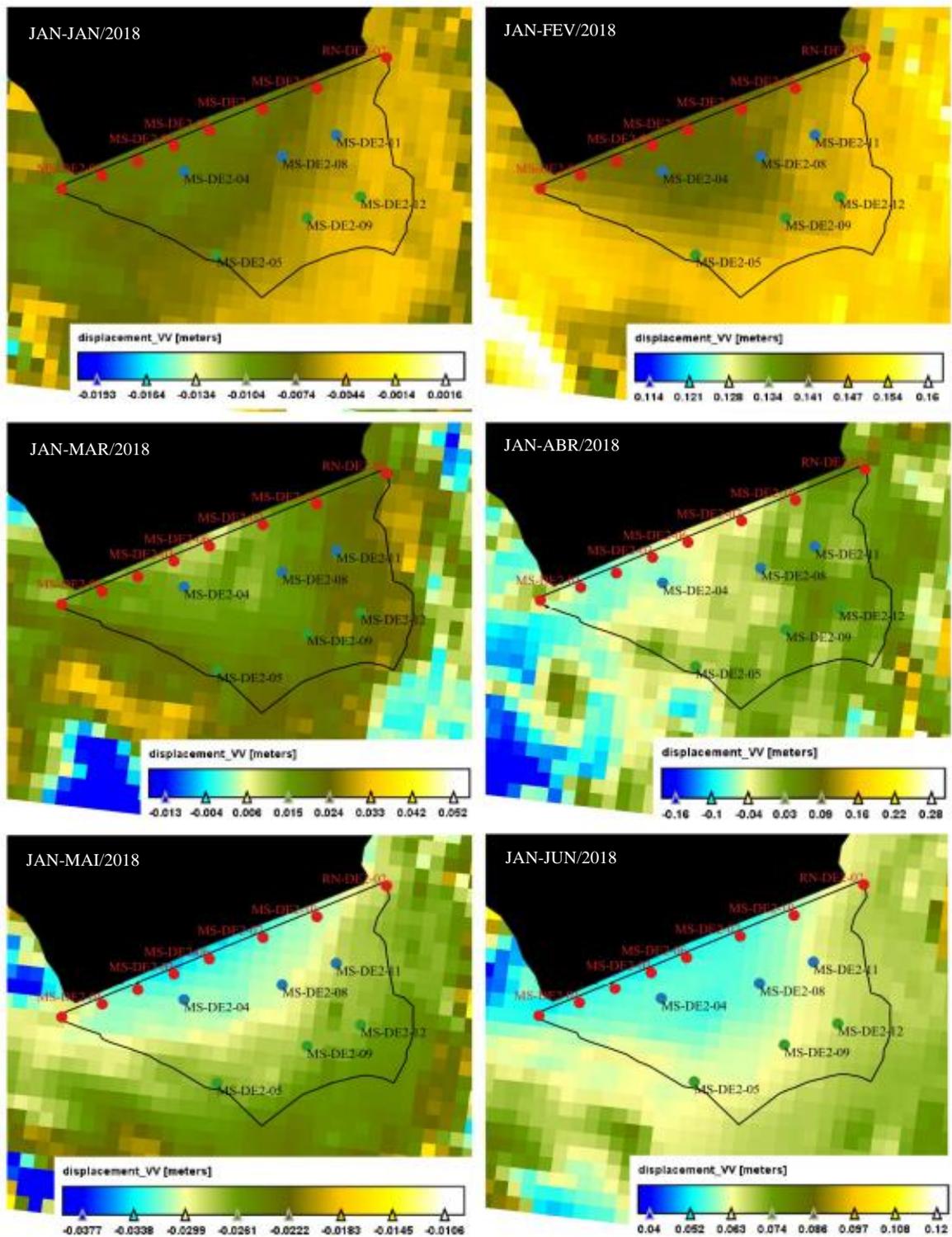


Figura 65 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no primeiro semestre de 2018
 Fonte: Autor, 2023

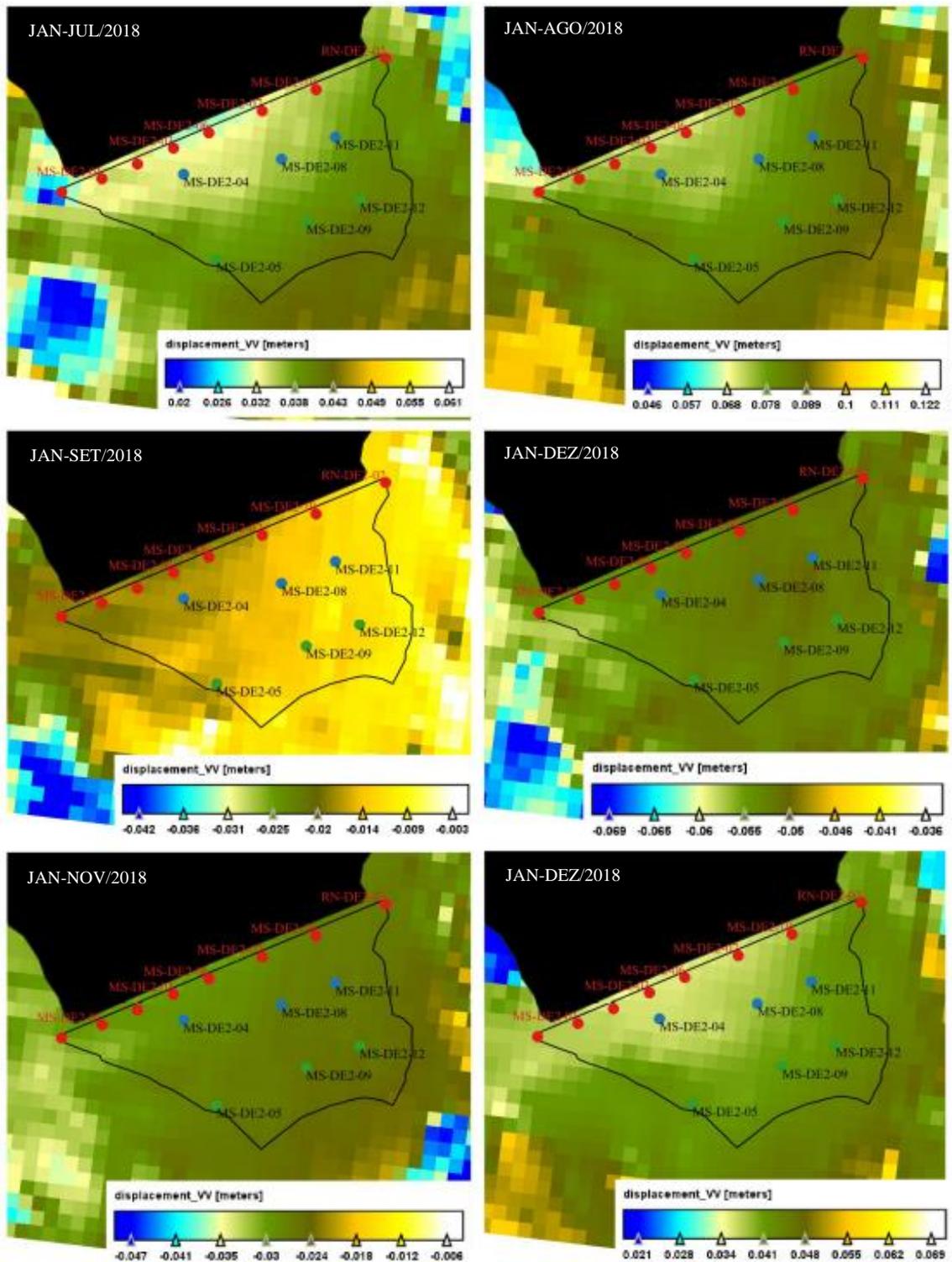


Figura 66 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no segundo semestre de 2018
 Fonte: Autor, 2023

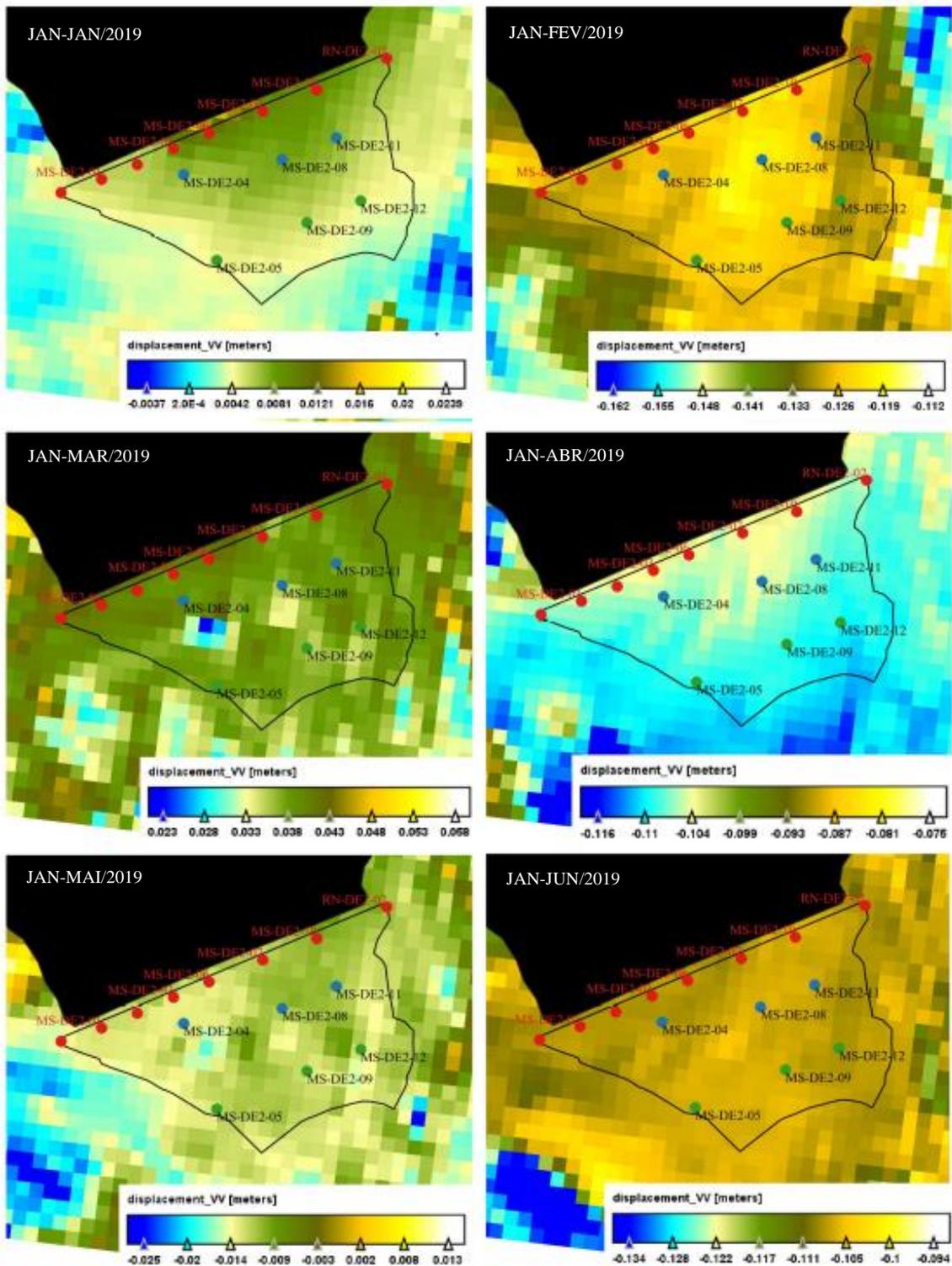


Figura 67 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no primeiro semestre de 2019
 Fonte: Autor, 2023

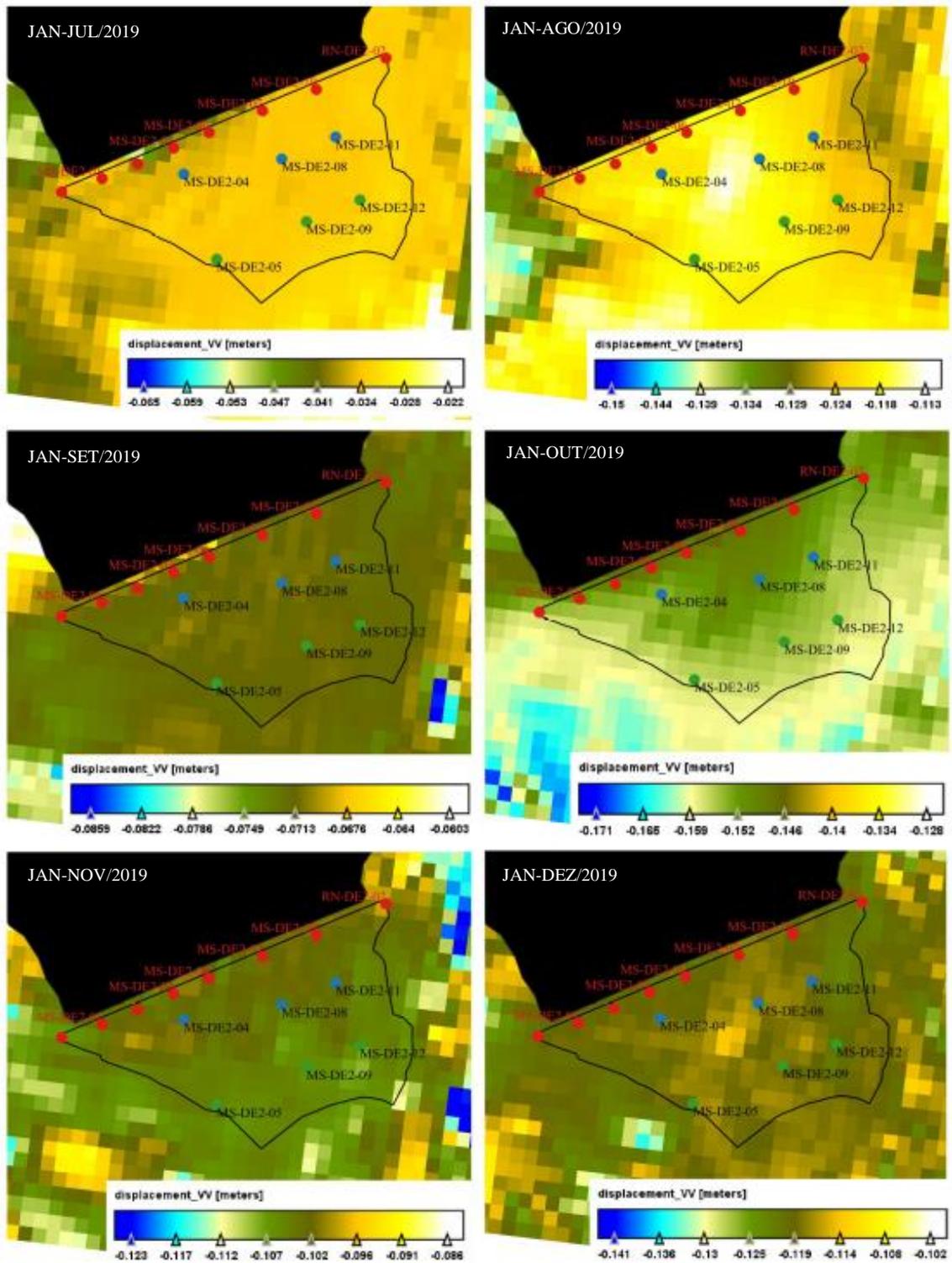


Figura 68 - Imagem matricial dos deslocamentos absolutos no segundo semestre de 2019.
 Fonte: Autor, 2023

5.4. Análise dos deslocamentos.

Foram plotados os dados dos deslocamentos acumulados ao longo do tempo pela interferometria e pelo nivelamento geométrico, fornecidos por FURNAS, aplicando-se um rebaixamento da cota da superfície (offset) nos dados InSAR de 50mm para 2018 e 115mm para 2019, para fins de comparação. As figuras 69 a 71, referentes, respectivamente, a crista, berma intermediária e berma inferior, apresentam os deslocamentos superficiais verticais, informando os respectivos valores de coerência no intuito de indicar a qualidade da informação dos deslocamentos gerados pela técnica InSAR (classificados como “BOM” $>0,50$ ou “EXCELENTE” $>0,70$), quando não informado o valor de coerência nos rótulos, significa que aquele marco apresentou classificação “BAIXA” ou “MODERADA” (Tabela 5).

Os deslocamentos apresentados nas referidas figuras referem-se aos valores observados por InSAR entre 14/07/2017 a 15/06/2018 (aproximadamente 11 meses) e 15/06/2018 a 21/08/2019 (aproximadamente 14 meses) e por nivelamento geométrico entre 12/12/2016 a 14/06/2018 (aproximadamente 18 meses) e 14/06/2018 a 27/08/2019 (aproximadamente 14 meses). Para o período de 2017-2018 não foi calculada a diferença entre os deslocamentos detectados por nivelamento geométrico e InSAR, pois os períodos são significativamente diferentes (18 e 11 meses, respectivamente), porém é possível fazer uma comparação qualitativa. Já em 2018-2019, os períodos de análise das duas técnicas utilizadas são aproximadamente iguais, 14 meses, com uma pequena diferença em dias. A comparação entre os dados de deslocamentos absolutos da interferometria com as medições em campo por nivelamento geométrico está apresentada na Tabela 13.

Apesar da diferença entre os períodos e valores apurados entre as técnicas utilizadas no monitoramento, nota-se um comportamento qualitativo similar quanto aos deslocamentos dos marcos superficiais. Na crista notam-se deslocamentos maiores nas regiões próximas as ombreiras (seções B e D – figuras 44 e 46) e menores na região central (seções D e E – figuras 45 e 47), enquanto na berma intermediária os deslocamentos maiores estão mais próximos da ombreira esquerda (seção B). Tanto no período de 2017-2018, como no de 2018-2019, o nivelamento geométrico detectou as seguintes regiões de maiores deslocamentos em cada uma das três plataformas consideradas: crista, nos marcos MS-DE2-01 e MS-DE2-10; berma intermediária, no MS-DE2-11; berma inferior, no MS-DE2-12. Observa-se que os

marcos MS-DE2-10, MS-DE2-11 e MS-DE2-12 estão alinhados na seção transversal de monitoramento mais próxima da ombreira esquerda. Esta constatação quanto às regiões com

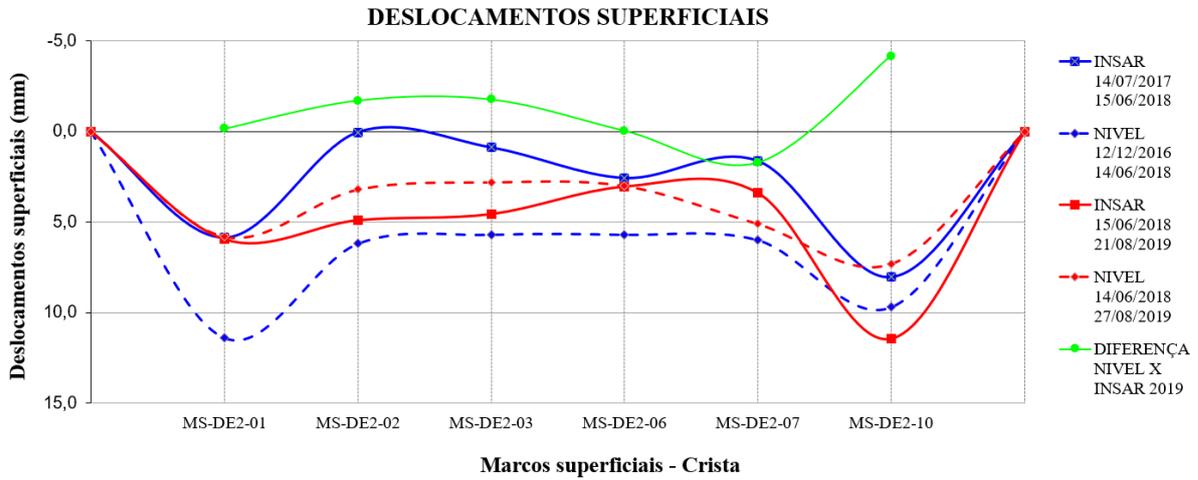


Figura 69 - Deslocamentos superficiais absolutos InSAR versus nivelamento – Crista
Fonte: Autor, 2023

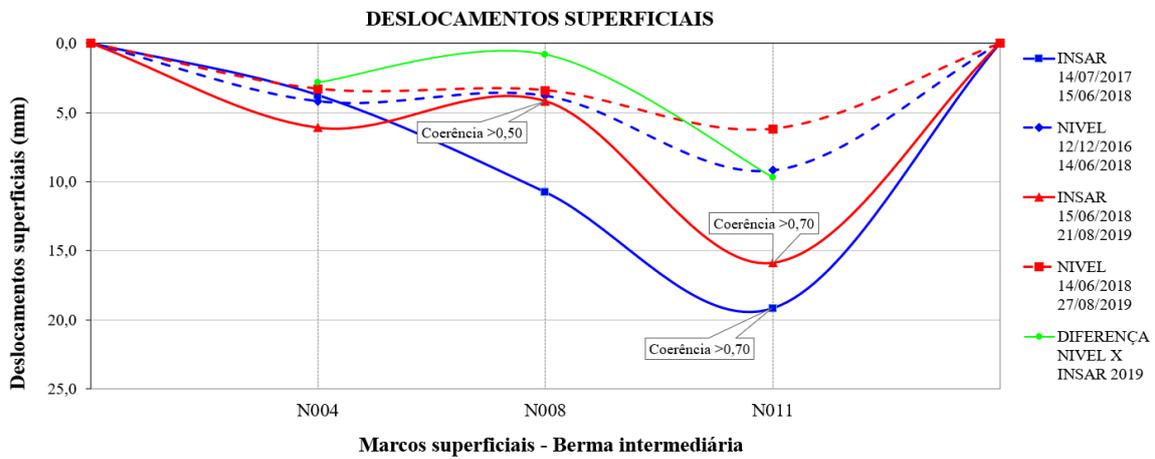


Figura 70 - Deslocamentos superficiais absolutos InSAR versus nivelamento -Berma intermediária
Fonte: Autor, 2023

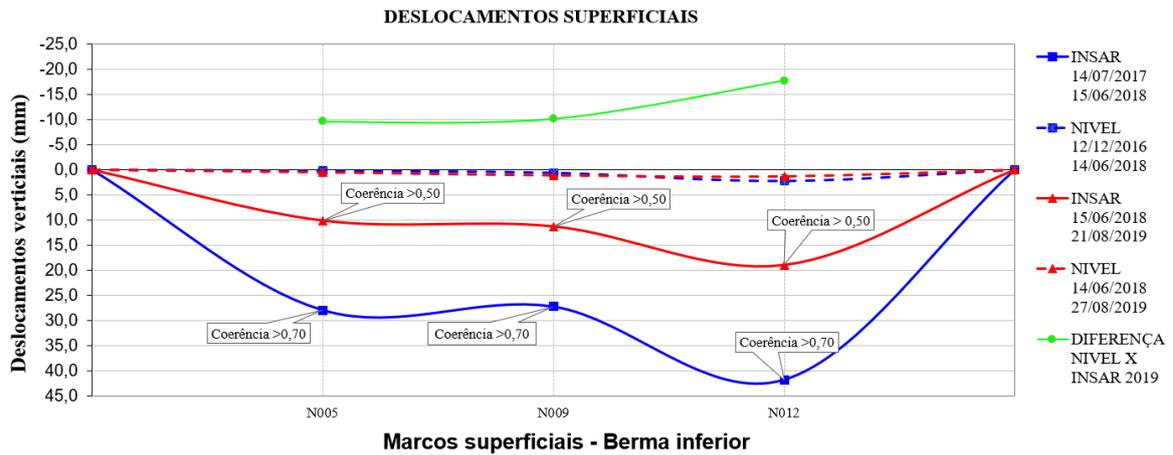


Figura 71 - Deslocamentos superficiais absolutos InSAR versus nivelamento -Berma inferior
 Fonte: Autor, 2023

Tabela 13 – Comparação entre deslocamentos observados através de InSAR e nivelamento geométrico

LOCAL	MARCO SUPERFICIAL	2017-2018		2018-2019		Diferença entre métodos (módulo - mm)
		Nivelamento geométrico (mm)	*InSAR (mm)	Nivelamento geométrico (mm)	*InSAR (mm)	
		Período: de 12/12/2016 a 14/06/2018 (aprox. 18 meses)	Período: de 14/07/2017 a 15/06/2018 (aprox. 11 meses)	Período: de 14/06/2018 a 27/08/2019 (aprox. 14 meses)	Período: de 15/06/2018 a 21/08/2019 (aprox. 14 meses)	
CRISTA	MS-DE2-01	11,4	5,9	5,8	6,0	0,2
	MS-DE2-02	6,2	0,1	3,2	4,9	1,7
	MS-DE2-03	5,7	0,9	2,8	4,6	1,8
	MS-DE2-06	5,7	2,6	3,0	3,0	0
	MS-DE2-07	6,0	1,6	5,1	3,4	1,7
	MS-DE2-10	9,7	8,1	7,3	11,5	4,2
BERMA INTERM	MS-DE2-04	4,2	3,8	3,3	6,1	2,8
	MS-DE2-08	3,8	10,8	3,4	4,2	0,8
	MS-DE2-11	9,2	19,2	6,2	15,9	9,7
BERMA INFERIOR	MS-DE2-05	0,2	27,9	0,5	10,1	9,6
	MS-DE2-09	0,6	27,2	1,1	11,3	10,2
	MS-DE2-12	2,2	41,8	1,3	18,9	17,6

*em amarelo: coerência com qualidade boa; em verde: coerência com qualidade excelente

Fonte: Autor, 2023

maiores deslocamentos foi também observada pelos resultados do InSAR para os dois períodos analisados. Constata-se, portanto, uma boa concordância qualitativa da distribuição dos deslocamentos da superfície da barragem entre as duas técnicas.

Como já abordado, as campanhas de nivelamento geométrico, a partir do ano de 2015, foram efetuadas uma vez por ano, com exceção de 2017 que não fora executada. Os baixos valores de deslocamento detectados e o quantitativo de dados de nivelamento geométrico não permitiu uma avaliação suficiente da acurácia da medição interferométrica.

Como não foi possível a obtenção dos valores dos deslocamentos previstos em projeto para a barragem estudada, fez-se uma comparação com os valores típicos de recalque na crista apresentados na Tabela 3 do item 2.2.3. Considerando a idade da barragem estudada, em 2019, de 9 anos após a construção, núcleo amplo e solo arenoso-argiloso, os recalques típicos na crista seriam de, aproximadamente, de 0,10 a 0,35% da altura da barragem, ou seja, 7,50 cm a 26,25cm. Estes valores específicos de recalques são típicos para um tempo de 10 anos após a construção. As medições através de nivelamento geométrico de 2011 até 2019 (8 anos) indicaram deslocamentos na crista variando de 13,74 cm (marco MS-DE2-06) a 24,22 cm (marco MS-DE2-01), tendo valor médio de 18,42 cm. Observa-se que os valores medidos tanto pelo nivelamento geométrico como pela interferometria estão dentro da faixa prevista, não indicando risco associado à ruptura.

Analogamente ao nivelamento geométrico, para avaliação das magnitudes do deslocamento adotou-se um plano de referência, compatibilizando as superfícies formadas pelos marcos superficiais a uma superfície média formada pelas RN1 e RN2, próximas à crista da barragem. Rosa (2004) cita a necessidade de um modelo de superfície preciso para calibração da fase interferométrica, como não foi possível a adoção de pontos de controle ou modelos gerados por ortorretificação, os marcos superficiais tomaram como referencial para cálculo dos deslocamentos, essa superfície, gerando a informação de deslocamentos relativos.

Os deslocamentos superficiais relativos ao longo do tempo são demonstrados nas figuras 72 e 73. Verifica-se que a estrutura da barragem sofreu maiores variações de deslocamentos no período de maio a agosto de 2018, com amplitude máxima de 9,2mm, porém nota-se um comportamento uniforme dos deslocamentos, visto pela linha de tendência média, quando avaliados todos os marcos durante o período.

Solicitações de carga poderiam influenciar nos deslocamentos detectados então, o nível d'água também foi plotado na tentativa de avaliar sua influência em relação aos deslocamentos. Patrício (2018), observou uma correlação entre os deslocamentos, ainda que horizontais, e o nível d'água no monitoramento por InSAR de uma barragem terra e enrocamento em Portugal, entretanto o citado autor desconsiderou por entender que não havia alteração significativa na precisão daquele monitoramento. No presente trabalho não foi possível observar esta correlação, exceto marcos isolados quando confrontados com a linha média de tendência dos deslocamentos.

Numa verificação secundária, plotou-se os dados de deslocamentos sobre o perfil longitudinal da estrutura para ilustrar o comportamento da barragem nesta direção (figuras 74 a 76).

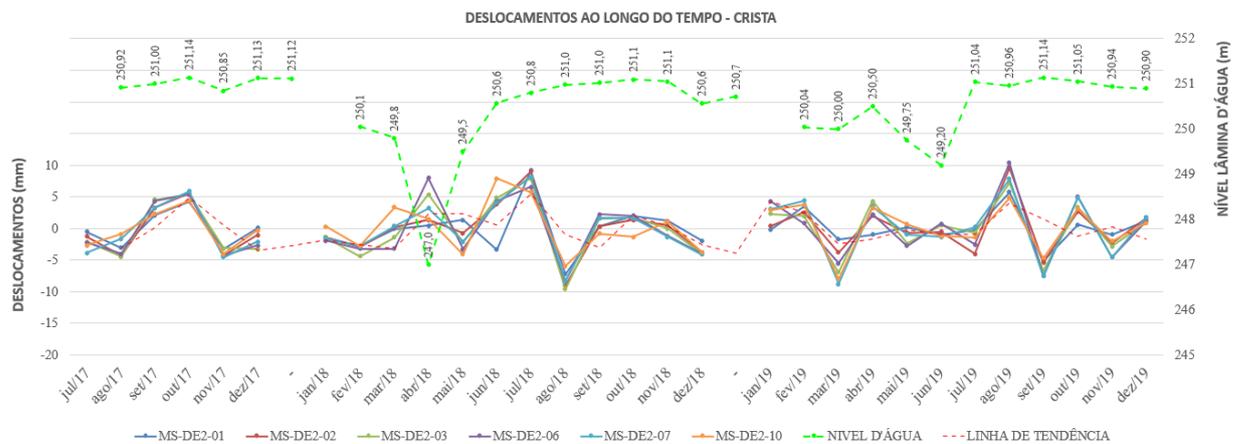


Figura 72 - Deslocamentos relativos ao longo do tempo – Crista
Fonte: Autor, 2023

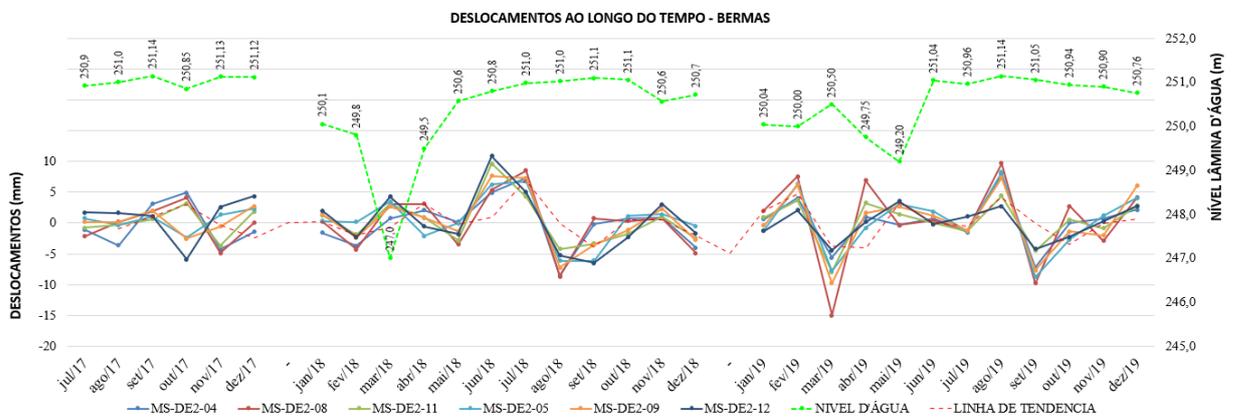


Figura 73 - Deslocamentos relativos ao longo do tempo – Bermas
Fonte: Autor, 2023

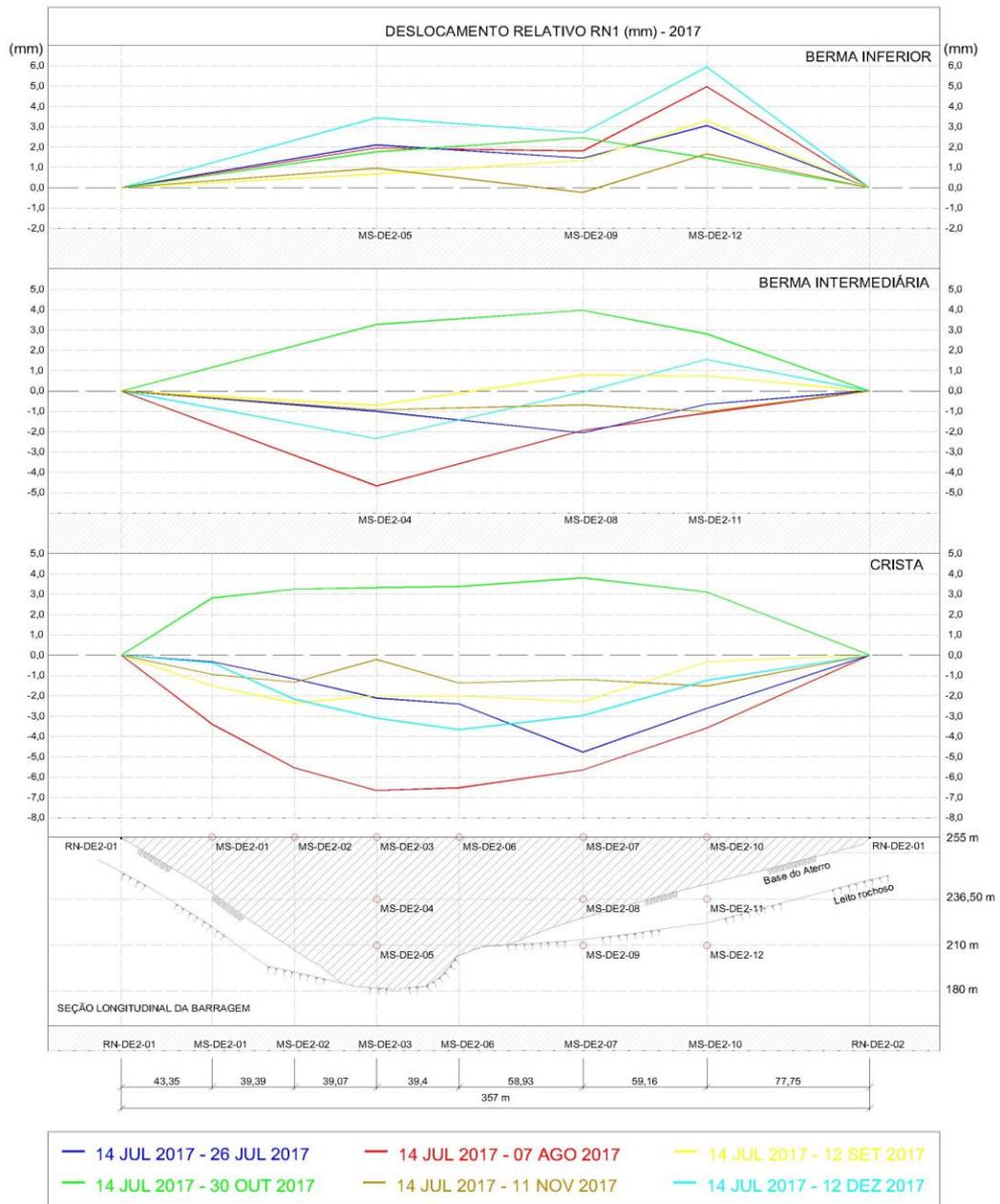


Figura 74 - Deslocamentos relativos sobre o perfil longitudinal - 2017

Fonte: Autor, 2023

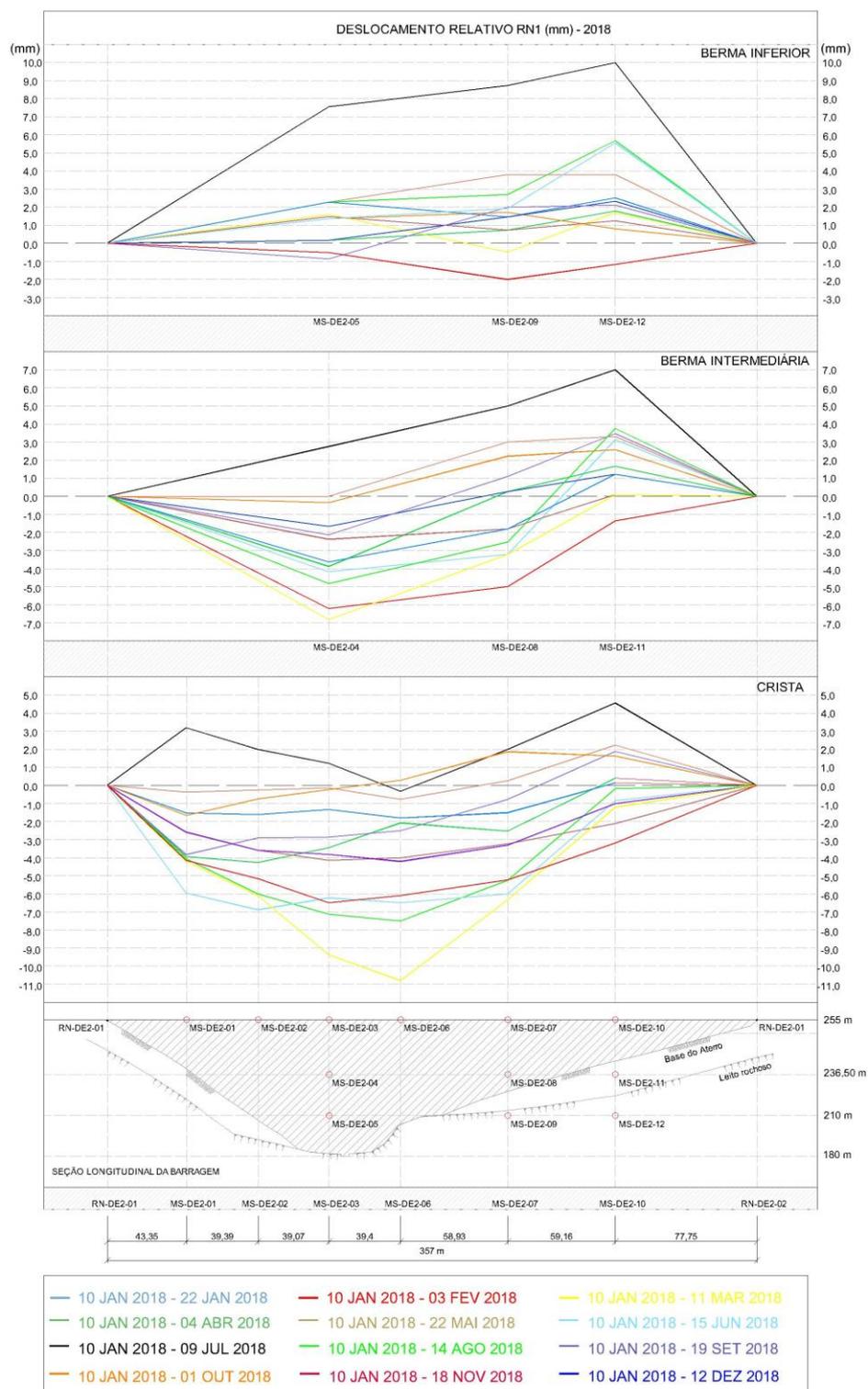


Figura 75 - Deslocamentos relativos em 2018 sobre o perfil longitudinal
 Fonte: Autor, 2023

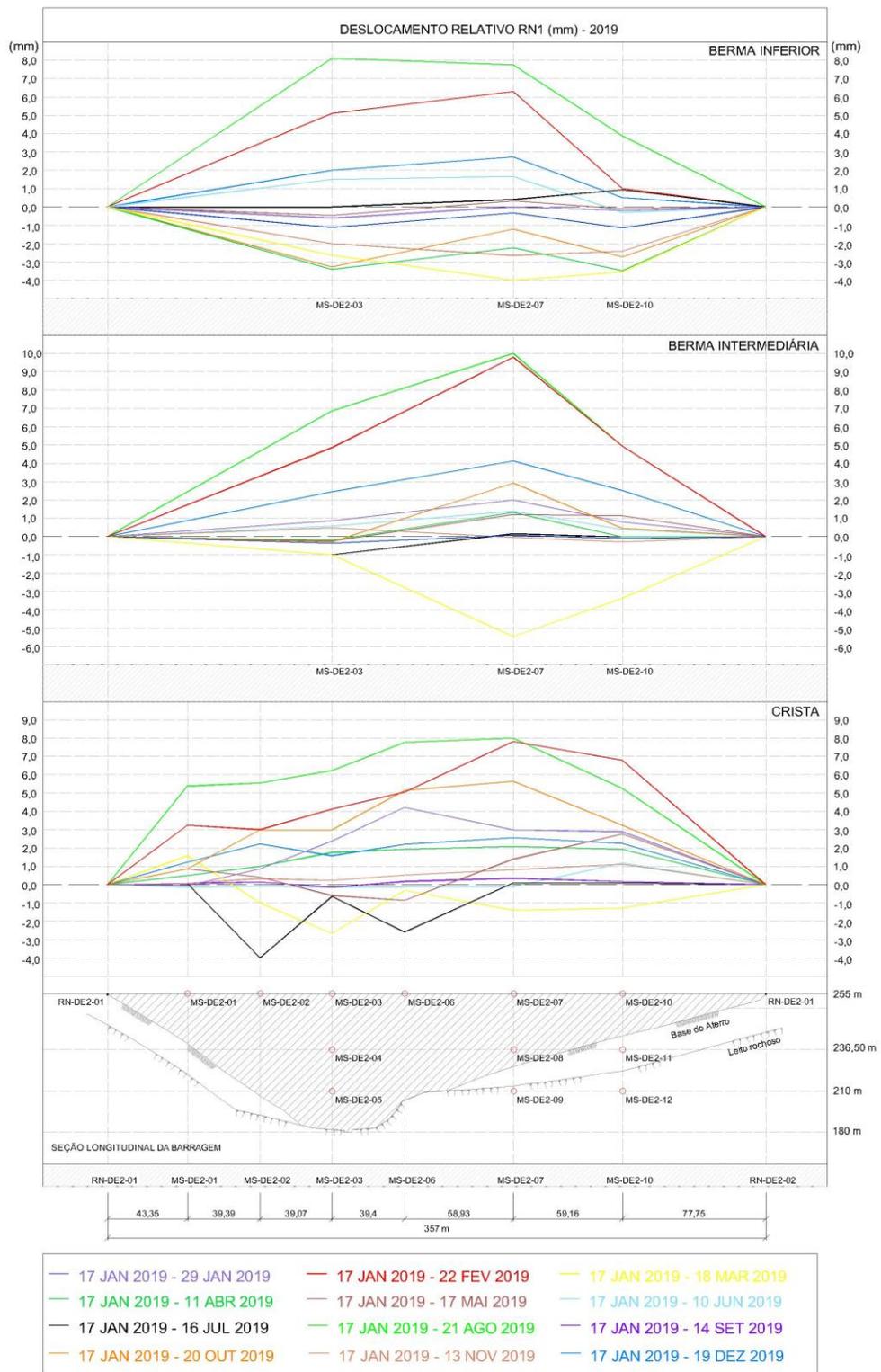


Figura 76 - Deslocamentos relativos em 2019 sobre o perfil longitudinal
Fonte: Autor, 2023

Por fim, Silveira (1982), recomenda a verificação da velocidade dos deslocamentos superficiais em estruturas de barragem, em função do tempo, para detecção de anormalidades que possam comprometer a segurança. Variações no comportamento mecânico da barragem, sem que haja qualquer variação da condição de contorno, como elevação do maciço do barramento na fase construtiva ou variação do nível d'água, pode ser um indício de instabilidade, fazendo-se necessária uma avaliação mais profunda. As figuras 77 a 88 apresentam as velocidades do deslocamento calculadas entre dois pares interferométricos consecutivos, bem como o deslocamento superficial ao longo do tempo.

O mesmo autor define ainda que se deve estabelecer parâmetros de recalques teóricos aceitáveis para cada tipo de barragem e, a partir destes parâmetros, executar a confrontação dos mesmos com as leituras indicadas pelo monitoramento, porém não houve a acesso as informações sobre deslocamentos projetados para confrontação com os medidos.

Quanto à velocidade dos deslocamentos, pode-se inferir da Tabela 2 do item 2.4 (Hunter, 2003) que a velocidade média de recalques de uma barragem de núcleo amplo e solo areno-argiloso entre 3 e 10 anos após a construção seria de aproximadamente 0,1% da altura da barragem dividido por 7 anos. Para o presente caso estudado, sendo a altura de 75m, o recalque entre 3 e 10 anos seria de 75mm, indicando uma velocidade média aproximada de 10,7mm/ano. No período estudado, de 2017 a 2019 (entre 6,5 a 9 anos após a construção), observou-se um deslocamento, variando de -8,4mm (recalque do marco superficial MS-DE2-06) a +17,4mm (soerguimento do marco superficial MS-DE2-12). As velocidades médias de deslocamentos dos marcos, estimadas pelo InSAR ao longo do período analisado (888 dias), variaram de -0,1 mm/ano (marco superficial MS-DE2-02) a 32,3 mm/ano (marco superficial MS-DE2-12).

Fusaro (2007) explica que deve ser avaliada a variação da velocidade de cada marco, considerando sempre uma leitura anterior, uma vez que espera-se que a velocidade do deslocamento seja decrescente. Em caso de uma possível detecção de aumento das velocidades com o tempo, deve-se investigar tal situação junto com outros parâmetros medidos, além de se utilizar outros métodos de monitoramento para ratificar ou rejeitar os dados obtidos.

A aplicação da tecnologia InSAR no caso estudado mostrou-se bastante útil ao fornecer importantes dados complementares para o monitoramento de deslocamentos de taludes ao longo do tempo, destacando-se a vantagem de constituir, com relativa facilidade,

uma série temporal com menores intervalos de tempo, sendo necessário considerar as limitações principalmente relacionadas à qualidade das imagens. No caso estudado, diante da pequena magnitude dos deslocamentos, o que provavelmente se deve ao tempo de vida da barragem e a pequenas variações do nível d'água do reservatório, não foi possível associar variações pontuais da velocidade de deslocamentos a razões geotécnicas, não indicando comportamento geotécnico anômalo quanto aos deslocamentos superficiais.

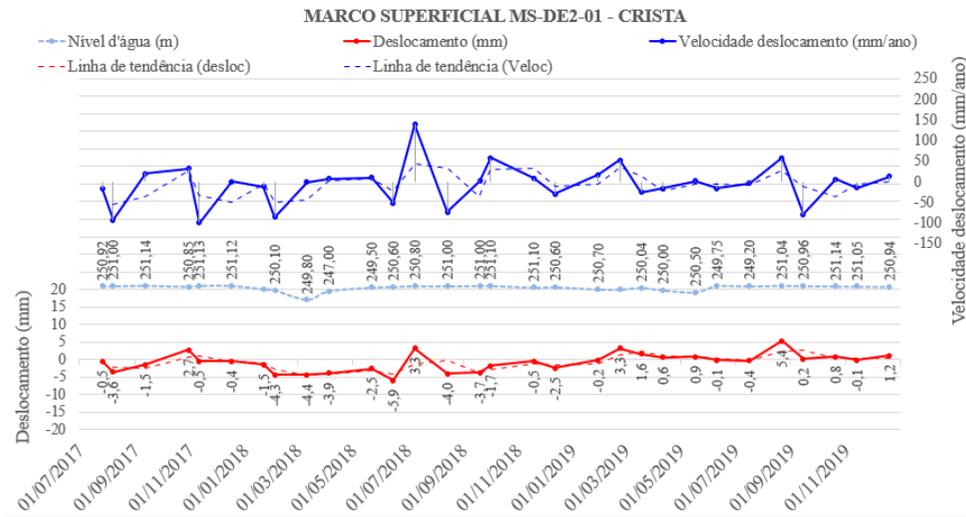


Figura 77 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-01
Fonte: Autor, 2023

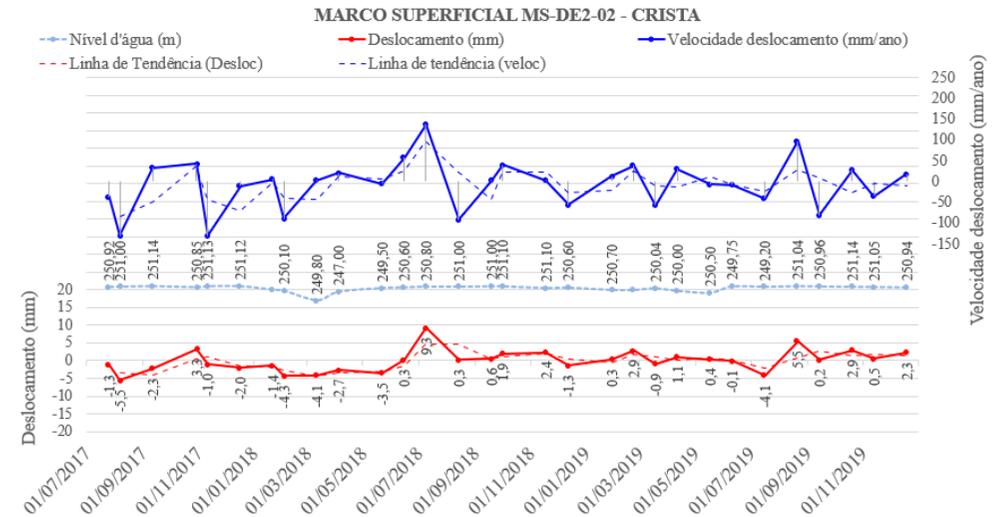


Figura 78 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-02
Fonte: Autor, 2023

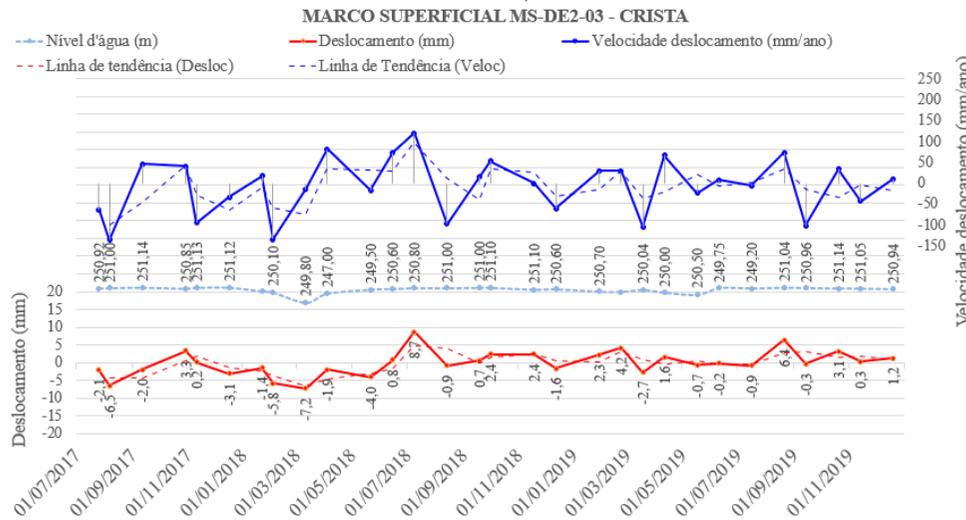


Figura 79 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-03
Fonte: Autor, 2023

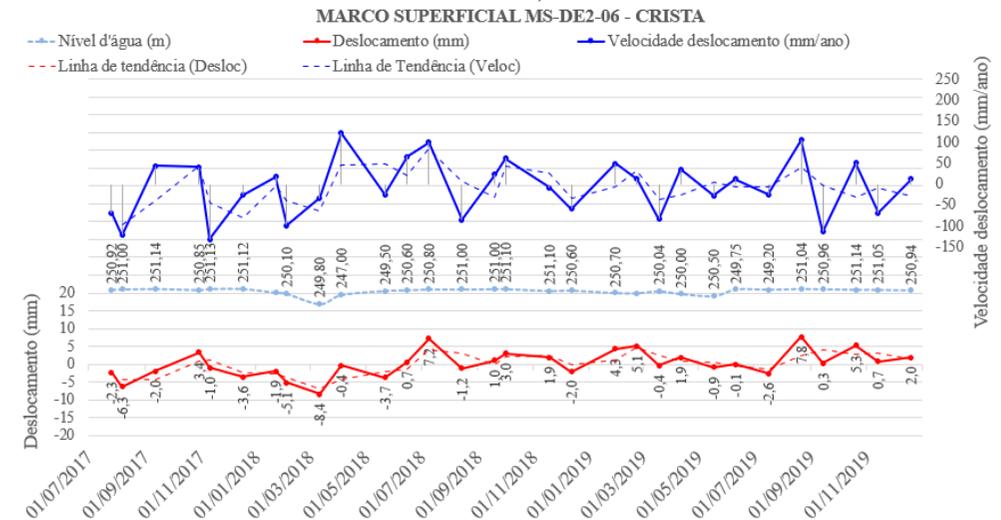


Figura 80 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-06
Fonte: Autor, 2023

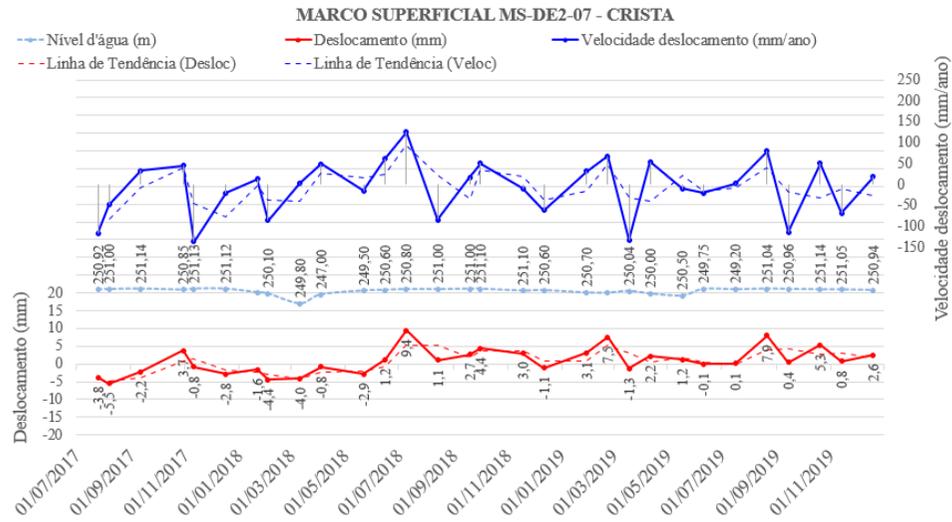


Figura 81 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-07
Fonte: Autor, 2023

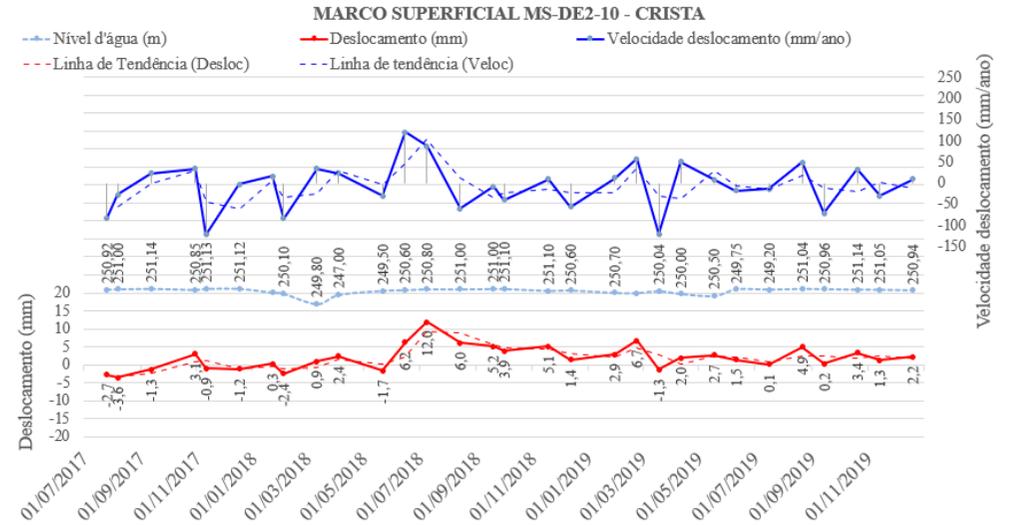


Figura 82 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-10
Fonte: Autor, 2023

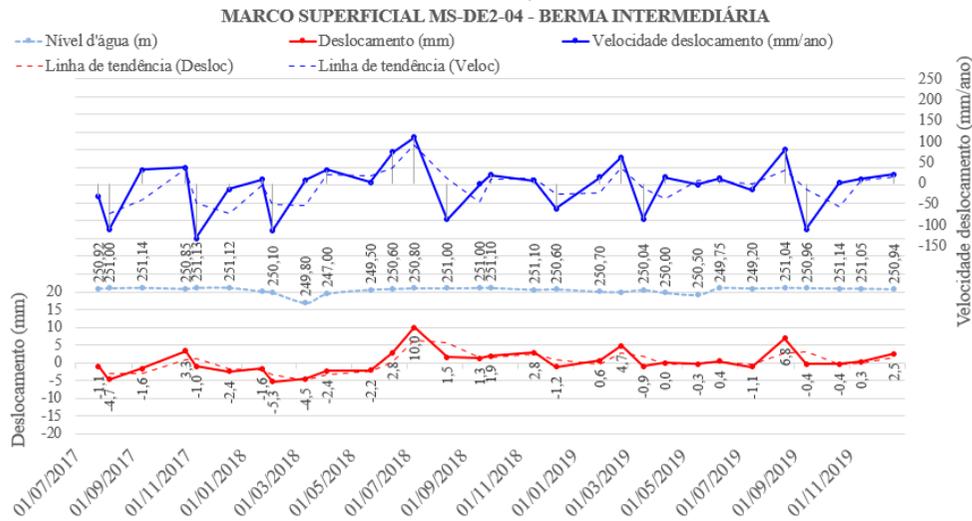


Figura 83 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-04
Fonte: Autor, 2023

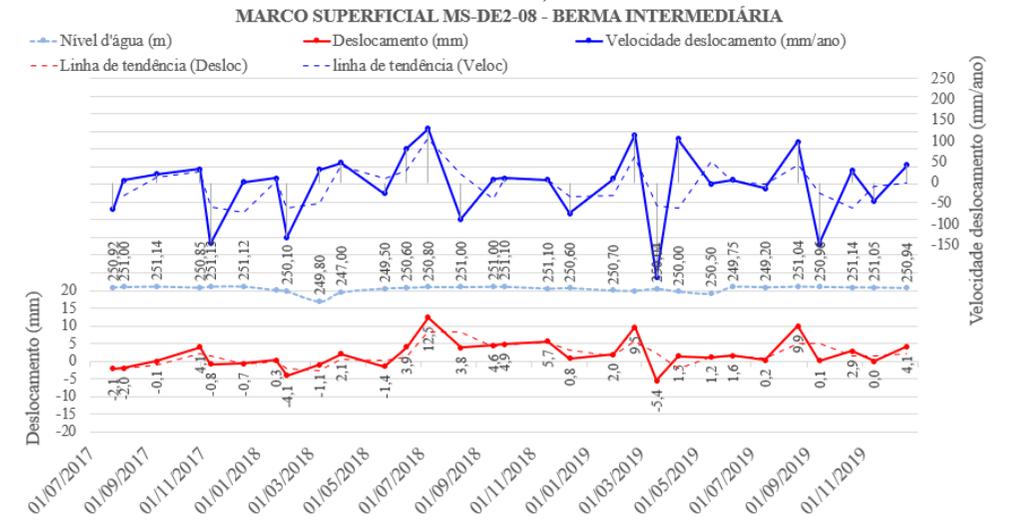


Figura 84 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-08
Fonte: Autor, 2023

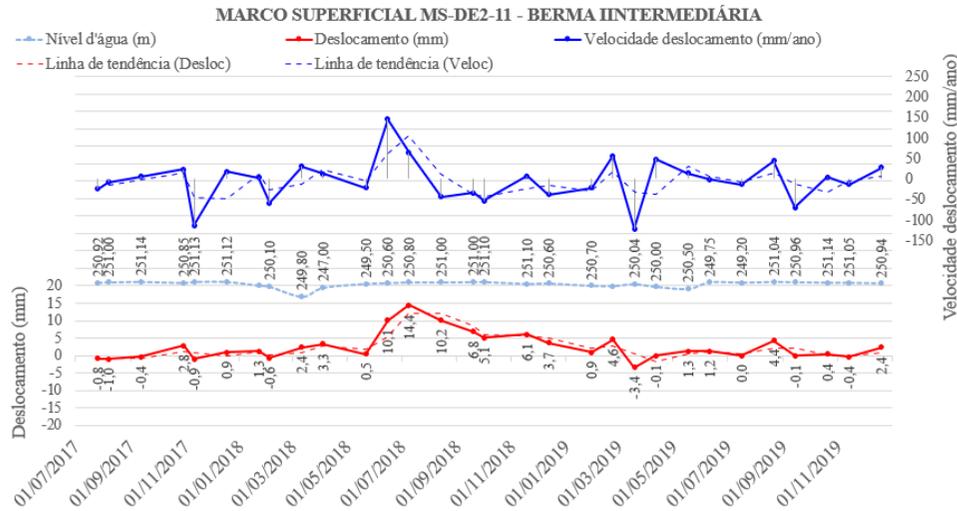


Figura 85 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-11
Fonte: Autor, 2023

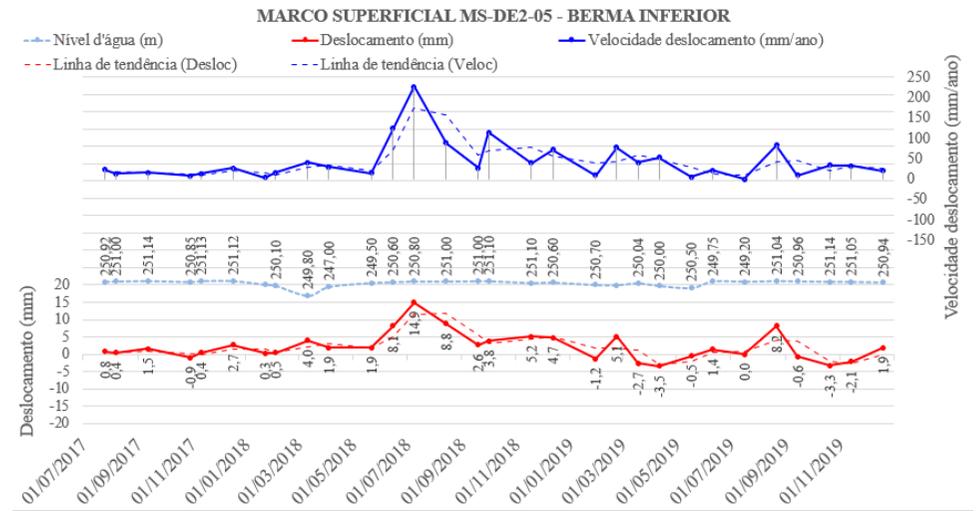


Figura 86 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-05
Fonte: Autor, 2023

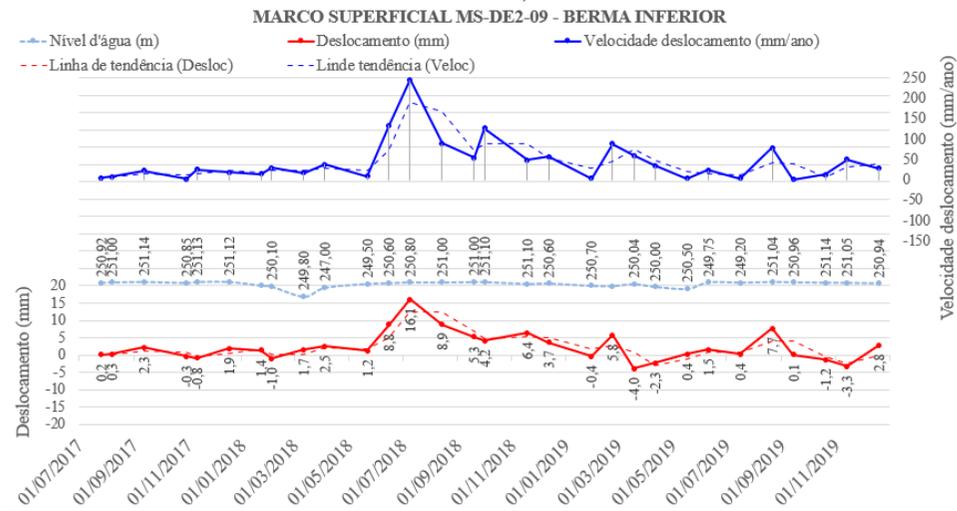


Figura 87 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-09
Fonte: Autor, 2023

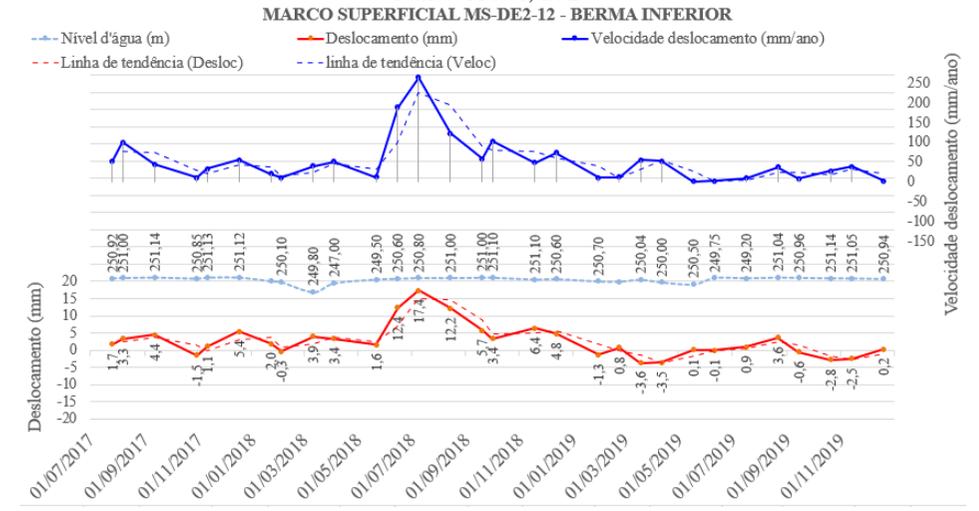


Figura 88 - Velocidade de deslocamento - Marco MS-DE2-12
Fonte: Autor, 2023

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A técnica InSAR, combinando dados de um par de imagens de radar de abertura sintética e um modelo digital de elevação, foi suficiente para obtenção de informações relativas ao deslocamento superficial de alvos predeterminados (marcos superficiais) da estrutura analisada que consistiu em uma barragem de terra e enrocamento. Ressalta-se que a adoção de um modelo de superfície mais preciso, por topografia ou ainda por sensoriamento remoto, poderia indicar valores de deslocamentos mais acurados. Os princípios da técnica podem ser aplicados em massa através de um processamento, que permite a geração de mapas de elevação e mapas de deformação com extensões quilométricas e precisões milimétricas para os deslocamentos, o que somado a possibilidade de um incremento na frequência do monitoramento de deslocamentos superficiais comparando-se com a topografia, representa um ganho para o monitoramento.

Entretanto, alguns fatores limitam o sucesso na aplicação da técnica InSAR. O mais severo deles é a decorrelação temporal, devido ao deslocamento não-coerente dos dispersores que compõem um alvo, comprovado pela existência de marcos com baixa coerência, agravado pela existência de uma envoltória composta por vegetação densa e lâmina d'água do reservatório. Estas condições foram encontradas principalmente na crista da barragem, apresentando baixos valores de coerência e, portanto, dados de deslocamentos com menor confiabilidade, além disso a resolução espacial e o posicionamento da estrutura monitorada também podem ter influenciado na obtenção dos dados de deslocamento. Conforme Patrício (2018), satélites como o TerraSAR-X e o COSMO SKY MED, com resoluções de 1m, são indicados para análise de estruturas artificiais, já os de menor resolução e com banda espectral adequada, podem ser usados para análise de obras de origem natural. Outra limitação importante são os efeitos atmosféricos, que podem criar informações equivocadas nos mapas de elevação ou deformação se não forem interpretados e isolados adequadamente.

Os resultados do trabalho, tendo uma barragem de terra e enrocamento como estudo de caso, confirmaram a viabilidade do uso do InSAR como técnica complementar para o monitoramento de deslocamentos de taludes. Foi possível obter dados de deslocamento com precisão milimétrica e velocidade de deslocamentos em toda a extensão da área de projeção do talude da barragem (aproximadamente 47 mil metros quadrados) e avaliar a coerência interferométrica, tendo esta variado de 0,12 a 0,91. A comparação entre a distribuição de deslocamentos superficiais, obtidos por nivelamento geométrico e por interferometria, indicaram que os resultados das duas técnicas foram qualitativamente similares e coerentes

com a espessura do material de fundação. Os baixos valores de deslocamento detectados e o quantitativo de dados de nivelamento geométrico não permitiu, entretanto, uma avaliação suficiente para concluir quanto a acurácia da medição interferométrica.

Destaca-se que técnica de InSAR ainda precisa ser mais difundida, principalmente, a partir de estudos em instituições de ensino e pesquisa, visando o aprimoramento de seu uso de forma a obter resultados de melhor qualidade na produção de mapeamentos e monitoramentos.

O estudo de caso revelou que as possibilidades do emprego da técnica são promissoras. Citando Hellwich (1999, p. 9), "...o [seu] vívido desenvolvimento continua sugerindo que InSAR vai permanecer como uma das áreas de pesquisa mais gratificantes em sensoriamento remoto".

A disponibilidade de programas livres para processamento InSAR contribui significativamente para a popularização da técnica. De fato, foi a disponibilidade das imagens e do programa SNAP pela ESA que possibilitou a realização dos objetivos deste trabalho. Outrossim a viabilidade de dados de missões orbitais InSAR (com resolução espacial melhor e tempos de revisita menores, p.ex.), aliada ainda à difusão da técnica nos centros acadêmicos com softwares pagos para processamento InSAR, tipo SAR-Scape da empresa ENVI, SqueeSAR da empresa TER, entre outros, traria um ganho no campo da Ciência.

A disponibilidade desses dois ingredientes essenciais, imagens e programas, permitiria a geração e análise de mapas de elevação e de deformação com acurácia elevadas, contribuindo para a tomada de decisões apoiadas em geotecnologias. Como sugestões específicas de trabalhos futuros são:

- Desenvolver pesquisa similar a esta, tendo como estudo de caso barragens ou taludes de encostas com histórico de monitoramento de deslocamentos significativamente maiores e com mais dados de nivelamento geométrico, para melhor aferir a acurácia da técnica InSAR;
- Buscar e processar dados dos satélites TanDEM-X, NISAR ou RADARSAT sobre taludes de encostas ou de barragens brasileiras;
- Comparar os resultados dos deslocamentos por InSAR orbital, considerando superfícies de referência mais precisas, principalmente com aquelas executadas por levantamentos planialtimétricos;

- Pesquisar a quantificação das incertezas contidas nas medidas InSAR (HANSSEN, 2001).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem - 2016**. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/volume-ii-guia-de-orientacao-e-formularios-para-inspecoes-de-seguranca-de-barragem. Acesso em 10/02/2023.

AMANI, M et al. **Insar coherence analysis for wetlands in Alberta, Canada using time-series Sentinel-1 data**. *Remote Sensing*, v. 13, n. 16, p. 3315, 2021.

AMARAL, C. **Landslides disasters management in Rio de Janeiro**. 2a Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (2ª COBRAE), ABMS, ABGE e ISSMGE, Rio de Janeiro: 209-212, 1997.

ANDRIOLO, F. R. **Barragens Contemporâneas: Conhecimento, Durabilidade, Riscos e Falhas**. Cenário: Brasileiro. In: III SIMPÓSIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS E RISCOS ASSOCIADOS, Comitê Brasileiro de Barragens, 18 e 19 de novembro de 2008, Salvador, Bahia

AUGUSTO FILHO, O. **Carta de Risco de Escorregamentos Quantificada em Ambiente de SIG como Subsídio para Planos de Seguro em Áreas Urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP)**. Rio Claro, 2001. 195f. Tese (Doutorado) - Pós- Graduação em Geociências. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2001.

BRASIL. ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. Resolução nº 742, de 17 de outubro de 2011. Estabelece a periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento das inspeções de segurança regulares de barragem, conforme artigo 9º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/AGENCIAS/ANA/RE0742-171011.PDF>. Acesso em 10/03/2023

BUNCH, B; BUNCH, B. H.; HELLEMANS, A. **The history of science and technology: a browser's guide to the great discoveries, inventions, and the people who made them, from the dawn of time to today.** Houghton Mifflin Harcourt, 2004.

CARVALHO, J. **Barragens de terra: Conceitos básicos e análise da estabilidade.** 2. ed. Campina Grande: Reenge, 1997. 146 p.

CASTRO, A.L.C. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres.** Brasília, Ministério da Integração Nacional, Secretaria nacional de defesa civil, 173p, 2008

CATITA, C. M. S. **Interferometria radar por satélite aplicada ao estudo da morfologia e da deformação da região Pico-Faial (Açores).** Universidade de Lisboa, 2007.

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

CEMADEN – **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.** Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br>>. Acesso em 05 out. 2023

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES - CEPED. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012.** CEPED UFSC: 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis, 2013. 126 p.

CHAVES, J. C. **Uso da Tecnologia GPS na Monitoração de Deformação: Sistemas, Etapas e Experimentos.** Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** 2 edição. São Paulo: Edgar Blucher, 1980. 188p.

COLESANTI, C., FERRETTI, A., NOVALI, F., PRATI, C., ROCCA, F. **SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique.** Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. 41 (7), 1685–1701, 2003

COLLISCHONN, W. **Análise do Rompimento da Barragem de Ernestina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997, 193 p.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). Disponível em: < <http://www.cbdb.org.br> > Acesso em: 23 ago 2023.

CORSETTI, Marco et al. **Advanced SBAS-DInSAR technique for controlling large civil infrastructures: An application to the Genzano di Lucania dam**. *Sensors*, v. 18, n. 7, p. 2371, 2018.

CROSETTO, M., CASTILLO, M., ARBIOL, R., 2003. **Urban subsidence monitoring using radar interferometry: Algorithms and validation**. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (7), pp. 775–783

CURLANDER, J. C., MCDONOUGH, R. N. **Synthetic Aperture Radar: systems and signal processing**. 1991. John Wiley & Sons, Inc, New York.

DE ATHAYDE PINTO, Carolina et al. **O uso da tecnologia InSAR (interferometria de radar de abertura sintética) para o monitoramento da estabilidade de barragens**. XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGB, Belo Horizonte-MG, 2017.

DI CENZO, A. **Synthetic aperture radar and digital processing: an introduction**. Pasadena, CA, JPL, Feb. 1981 (JPL Publication)

DOBSON, M. C. **Forest information from Synthetic Aperture Radar**. *Journal of Forestry*. n.98, p.41-43, 2000.

DUNNICLIFF, J. (1988). **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. John Dunnyclif with the assistance of Gordon E. Green, Wiley-Interscience Publ., 577 pp, 1988

DWIVEDI, R. et al. **Multi-temporal SAR Interferometry for landslide monitoring**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 8, 2016.

ELACHI, C. **Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.

EM-DAT: **The Emergency Events Database** - Universite Catholique de Louvain (UCL). CRED, D. Guha-Sapir, Brussels, Belgium. Disponível em: https://www.emdat.be/emdat_db. Acesso em: 23 de Agosto de 2023.

ESA. **Sentinel-1 User Handbook**. Disponível em: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>. Acesso em: 23 fevereiro de 2023.

ESA. **Copernicus Open Access Hub**. Disponível em: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Acesso em: 23 fevereiro de 2023.

ESA. **Science Toolbox Exploitation Platform**. Disponível em: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>. Acesso em: 20 fevereiro de 2023.

FERRARO, N. G., PENTEADO, P., SOARES, P., TORRES, C. **Física: ciência e tecnologia**: vol. Único, 2001.

FERREIRA, A. L. M., ANDRZEJEWSKI, E. A. **Comparação de métodos de cálculo da ruptura de uma barragem hipotética**. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu, p. 1-12, 2015.

FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F., 2001. **Permanent scatterers in SAR interferometry**. Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. 39 (1), 8–20

F. GAMA, F. et al. **Deformations prior to the Brumadinho dam collapse revealed by Sentinel-1 InSAR data using SBAS and PSI techniques**. Remote sensing, v. 12, n. 21, p. 3664, 2020.

FUSARO, T C. **Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau.** 2007

GABOARDI, C. **Utilização De Imagem de Coerência Sar para Classificação do Uso da Terra: Floresta Nacional do Tapajós.** 2002. 137p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), São José dos Campos: INPE, 2002.

GENS, R. **Quality assessment of SAR interferometric data.** 1998. 119 p. Doctoral Thesis. Hannover: Technische Universität Hannover. 1998.

GENS, R.; GENDEREN, J. L. van. **Review article: Sar interferometry—issues, techniques, applications.** *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 10, p. 1803–1835, 1996.

GEORIO (2000) **Manual Técnico de Encostas. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2000, 2ª.ed.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192 p.

GUIMARÃES, R. F. et al. **Movimentos de Massa.** In: FLORENZANO, T. G. *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.* São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 6, p. 159 – 184.

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.

GOLDSTEIN, R. M., ZEBKER, H. A., WERNER, C. L. **Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping.** *Radio Science* 23 (4), 713-720, 1998

GOOGLE EARTH WEBSITE. <http://earth.google.com/>, 2023.

GUARNIERI, M. **The early history of radar [historical]**. IEEE Industrial Electronics Magazin, Vol. 4, No. 3, pp. 36 – 42, 2010.

HANSSSEN, R. F. **Radar interferometry: data interpretation and error analysis**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.

HELLWICH, O. et al. **SAR interferometry: Principles, processing, and perspectives**. Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner zum, v. 60, p. 109-120, 1999.

HIGHLAND, Lynn et al. **The landslide handbook: a guide to understanding landslides**. Reston: US Geological Survey, 2008.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook – A guide to understanding landslides**. U.S. Geological Survey (USGS). Reston, Virginia, p. 129p. 2008. (Circular 1325).

HUALLANCA, R.E.Z. **Mecanismos de Ruptura em Taludes Altos de Mineração a céu aberto**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 115p, 2004.

HUNTER, G; FELL, R. **The deformation behaviour of embankment dams**. University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Demográfico**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/sapucaia.html>>. Acesso em: 3 de outubro de 2023.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Dam Failures Statistical Analysis**, Bulletin 89: 1-73, 1995.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos. O Caso UHE – São Simão**.

Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007, 210 p.

LILLESAND, T.M. KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 3rd ed. John Wiley and Sons, New York, 1994.

LONDE, P. R.; BITAR, N. A. **Importância do uso de vegetação para contenção e combate à erosão em taludes do lixão desativado no município de Patos de Minas (MG)**. Perquirere: Patos de Minas: UNIPAM, 8(2):224-249, dez. 2011

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990, 291 p

MASSAD, F. **Obras de Terra**: Curso básico de geotecnia. São Paulo, Oficina de textos, 2003

MASSAD, F. **Obras de terra**: Curso básico de geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MASSONNET, D.; FEIGL, K. L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, v. 36, n. 4, p. 441–500, nov. 1998.

MENESCAL, R. A. **Gestão de segurança de barragens no Brasil: proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres**. Brasília: 2009. Disponível em: <https://www.defesacivil.se.gov.br/wp-content/uploads/2018/04/glossario.pdf>. Acessado em 04/03/2023.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens** – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.

MIKKELSEN, P E. **Field instrumentation**. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides Investigation and Mitigation*, TRB Special Report 247. National Academy Press, Washington, pp 278–316, 1996.

MOURA, M. R. C. **Medição de Recalques em Estruturas de Pontes e Edifícios: Estudos de Casos**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Fluminense – Niterói. 2008.

MURA, J.C. **Geocodificação Automática de Imagens de Radar de Abertura Sintética Interferométrico: Sistema Geo-InSAR**. 2001. 159p. (INPE-8209-TDI/764). Tese (Doutorado em Computação Aplicada), São José dos Campos: INPE, 2001.

NEGRÃO, P. **Detecção de deslocamentos superficiais no complexo minerador de Germano, Mariana-MG, com técnica integrada de A-DInSAR utilizando dados TERRASAR-X**. CEP, v. 12, p. 010.

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)**. 2004.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações**, 2ª Edição, Ed.tora Edgard Blücher Ltda., São Paulo,ISBN 85-212-0057- 9, 1995;297 P

NOVO, E.M.L.M; PONZONI, F. J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto, 2001. Disponível em < http://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR_DPI7.pdf> acesso em 16/02/2023.

NUMMER, V.A **Parâmetros Geológico-Geotécnicos controladores dos movimentos de massa na Rota do Sol/ RS 486 – Itati, RS**. 2003. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PARADELLA, Waldir Renato et al. **Radares Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações.** Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa-PB, p. 2506-2513, 2015.

PATRÍCIO, E. G. R. **Avaliação da Tecnologia InSar para Monitorização de Grandes Obras.** 2018.

PEDROSA, L. **Reavaliação do sistema de classificação de barragens realizado pelo DNPM.** 2017.

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.

SANDWELL, D.T.; PRICE, E.J. **Phase gradient approach to stacking interferograms.** Journal of Geophysical Research 103 (B12), 1998.

SARAIVA, Cátia Sofia Alves. **Avaliação do potencial das imagens Sentinel-1 para identificação de culturas agrícolas.** 2015. Tese de Doutorado.

SEPÚLVEDA, S. A.; PETLEY, D. N. **Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean.** Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 15, p. 1821-1833, 2015.

SILVA, D L A. **Geração e avaliação de produtos interferométricos dos dados ALOS/PALSAR FDB e PLR para fins de classificação da cobertura da terra na região Amazônia.** 2009.

SILVA, A. Q. **Conceitos Básicos de radar interferometria.** EADI/UFPA ed. Belém/Pa, 2013

SILVA, E T G et al. **Barragens hidrelétricas e desastres: uma avaliação de metodologias de gestão de risco ambiental.** 2012.

SILVEIRA, J.F.A. **Deformações e deslocamentos em maciços de barragem**. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Olinda, 1982.

SILVEIRA, R. M. **Comportamento Geotécnico de um Solo Coluvionar de São Vendelino (RS)**. 2008. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS (SNISB). Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2021>. Acesso em: 23/02/2023.

SKOLNIK, M. **Radar handbook**. McGraw-Hill Professional, 1990.

UNAVCO. **Synthetic Aperture Radar Satellites**. Disponível em: <https://www.unavco.org/instrumentation/geophysical/imaging/sar-satellites/sar-satellites.html>. Acesso em: 27/10/2023.

TEMPORIM, F. A. et al. **Application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in N5E open pit iron mine using TerraSAR-X data, in Carajás Province**, Amazon region. Brazilian Journal of Geology, v. 47, n. 2, p. 225-235, 2017.

TERZAGHI, K. **Mechanism of landslides**. 1950.

TERZAGHI, K. . **Mecanismo dos Escorregamentos de Terra** (Vol. Separata N° 467). São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 1952.

ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing-radar remote sensing and surface scattering and emission theory**. v.2. Reading, Addison-Wesley, 1982.

USBR. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. **Design Standards No. 13. Embankment Dams. Chapter 9. Static Deformation Analysis. Phase 4 (Final)**. 2011.

VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management.** 1997, 330 p. Doctoral Thesis - Wageningen Agricultural University. Series 5. Tropenbos-Guyana, Georgetown. 1997. ISBN: 90-5485-778-1

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes.** In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Ed.). Special report 176: landslides: analysis and control. Washington, DC: National Research Council, 1978. p 11-33

WICANDER, R., JAMES, M. **Fundamentos de geologia.** São Paulo, Cengage Learning, 2009

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

ZHOU, Wei et al. Insar observation and numerical modeling of the earth-dam displacement of shuibuya dam (China). **Remote sensing**, v. 8, n. 10, p. 877, 2016.