

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

**APLICABILIDADE E CONFIABILIDADE DO MONITORAMENTO DE
DESLOCAMENTO EM BARRAGEM DE MINERAÇÃO POR RADAR ORBITAL
INSAR**

BEATRIZ MAPA CLEMENTE

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA
COORIENTADOR: RAFAEL CERQUEIRA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: 401/2023

BRASÍLIA / DF, DEZEMBRO/2023

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**APLICABILIDADE E CONFIABILIDADE DO MONITORAMENTO DE
DESLOCAMENTO EM BARRAGEM DE MINERAÇÃO POR RADAR ORBITAL
INSAR**

BEATRIZ MAPA CLEMENTE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE**

APROVADA POR:

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc (UnB)
(COORDENADOR)**

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**KARLA CRISTINA ARAÚJO PIMENTEL MAIA, DSc
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA / DF, DEZEMBRO/2023

FICHA CATALOGRÁFICA

CLEMENTE, BEATRIZ MAPA

Aplicabilidade e Confiabilidade do Monitoramento de Deslocamento em Barragem de Mineração por Radar Orbital InSAR, 2023, 89 p. (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2023).

Dissertação Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. Monitoramento Geotécnico | 2. Deslocamento Superficial |
| 3. InSAR | 4. Barragem |
| 5. Instrumentação | 6. ENC/FT/UnB |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CLEMENTE, B. M. (2023). **Aplicabilidade e Confiabilidade do Monitoramento de Deslocamento em Barragem de Mineração por Radar Orbital InSAR**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-401/2023, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Beatriz Mapa Clemente

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Aplicabilidade e Confiabilidade do Monitoramento de Deslocamento em Barragem de Mineração por Radar Orbital InSAR

GRAU/ANO: Mestre/2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Beatriz Mapa Clemente

beatrizmapa@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e coorientador, prof. Newton Souza e Rafael Silva, por todos os ensinamentos e confiança durante meu período na UnB e ao longo da pesquisa. Obrigada pela paciência e atenção dedicada.

Aos meus pais e irmãos, por serem meu porto seguro, pela motivação e alegria diária.

Aos colegas da turma que foram apoio e parceiros nessa caminhada, e fizeram de Brasília um lugar que guardo no coração. Um agradecimento especial a Camila Pinto, Matheus Navarra, Daniela Giroto, Egídio Mazza, Mayara Luana e Paulo Netto.

À Karla Pimentel, Samuel Carneiro, Luciano Assis, Pamela Lisboa e Filipe Costa, por todo o ensinamento e apoio durante meu mestrado. Sou muito grata pela contribuição de vocês na profissional que estou me tornando.

À mineradora VALE SA pelo incentivo profissional e suporte no desenvolvimento da minha carreira, e pela disponibilidade dos dados.

Por fim, agradeço à Universidade de Brasília e a todos do programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

RESUMO

Aplicabilidade e Confiabilidade do Monitoramento de Deslocamento em Barragem de Mineração por Radar Orbital InSAR

O Radar Orbital InSAR (Interferometria por Radar de Abertura Sintética) tem ganhado grande visibilidade para fins de monitoramento de barragens nos últimos anos, principalmente após os episódios de rompimento da Barragem do Fundão em Mariana e da Barragem 1 em Brumadinho, nos anos de 2015 e 2019, respectivamente. A capacidade de monitorar grandes áreas a baixo custo, sem a necessidade de instalação de equipamento em campo, fez com que muitas estruturas geotécnicas começassem a ser monitoradas pela tecnologia de radar orbital para detecção de deslocamentos lentos, que possam ser precursores de instabilidades e anomalias. A técnica também tem se mostrado eficiente em apontar locais adequados para instalação de monitoramentos complementares como, por exemplo, prismas, radares terrestres e outros, além de atuar como redundância de monitoramento de deslocamentos. Assim como outras tecnologias, o InSAR também apresenta limitações que precisam ser conhecidas para um melhor entendimento de seus resultados, como a linha de visada e o tempo de revisita do satélite, geometria da estrutura, vegetação e existência de água ou umidade. Por ser uma técnica de recente aplicação no monitoramento de barragens, a bibliografia nacional ainda é pequena, o que acarreta pouco conhecimento acerca desse monitoramento e, conseqüentemente, muitas dúvidas relacionadas à aplicabilidade e confiabilidade dos dados entregues. Dessa forma, a presente pesquisa apresenta a capacidade de entrega de monitoramento pela técnica InSAR, no sentido de aplicabilidade em detecção de deslocamentos que podem ser precursores de diferentes modos de falha e de anomalias, considerando as normas brasileiras, os possíveis comportamento anômalos previstos nas normas do Brasil e as principais falhas de uma barragem. Com base nos resultados, o monitoramento via InSAR foi classificado como um monitoramento desejável, complementar ou não aplicável para a identificação de diversas anomalias de uma estrutura geotécnica ou locais propícios ao desenvolvimento de anomalias. A pesquisa apresenta também uma análise da confiabilidade técnica de dados do InSAR para um estudo de caso de uma barragem de mineração. Análises comparativas foram realizadas considerando os dados de monitoramento obtidos do InSAR (constelação COSMO-SkyMed) e de outra tecnologia tradicional de monitoramento de deslocamento, uma Estação Total Robótica. Devida à baixa diferença entre os resultados dos monitoramentos por meio das duas técnicas, o estudo de caso, além de mostrar a boa confiabilidade, contribuiu para aumentar a compreensão sobre o monitoramento de barragens de mineração via InSAR.

ABSTRACT

Applicability and Reliability of Displacement Monitoring in Mining Dam by Orbital Radar InSAR

Orbital Radar InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) has gained great visibility for dam monitoring purposes in the recent years, especially after the failure episodes of Fundão Dam in Mariana and Dam 1 in Brumadinho, in 2015 and 2019, respectively. The ability to monitor large areas at low cost, without the need to install any equipment in the field, has led to countless geotechnical structures being monitored by orbital radar to detect slow displacements, which can be precursors of instability and anomalies. The technique has also shown efficiency in indicate regions for the installation of complementary monitoring such as prisms and terrestrial radars, in addition to acting as a redundancy of displacement monitoring. Like any other technologies, InSAR also has limitations that need to be known for a better understanding of its results, such as the satellite line of sight and revisit time, the structure geometry, vegetation and existence of water or humidity. As it is a recently applied technique in dam monitoring, the national bibliography is still small, which leads to a small amount of knowledge about this monitoring and doubts related to the applicability and reliability of the delivered data. In this way, this research presents the deliverability of the InSAR technique, in the sense of applicability in displacements detecting that can be precursors of different failure modes and in anomalies monitoring, considering the Brazilian rules, the possible anomalous behavior and the main dam failures. Based on the results, InSAR monitoring was classified as a desirable, complementary, or not applicable monitoring for the identification of several geotechnical structure anomalies or places where anomalies could be developed. The research also presents an analysis of the functionality and technical reliability of the InSAR data for a mining dam case study. Comparative analyzes were conducted considering the monitoring data obtained from InSAR (COSMO-SkyMed constellation) and another traditional displacement monitoring technology, a Robotic Total Station. Due to the low difference between monitoring results using both techniques, the case study presented good reliability and contributed to increase the understanding about monitoring mining dams with InSAR.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA.....	1
1.2	OBJETIVO.....	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO	4
2.2	PRINCIPAIS MODOS DE FALHA EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO E PROGRAMA DE MONITORAMENTO.....	9
2.3	SENSORIAMENTO REMOTO	16
2.4	MONITORAMENTO INSAR EM CASO DE RUPTURA.....	28
2.5	ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA.....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	ANÁLISE DA APLICABILIDADE DOS DADOS DE INSAR	39
3.2	ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DOS DADOS DE INSAR: ESTUDO DE CASO.....	40
3.2.1	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA EM ESTUDO.....	41
3.2.2	ANÁLISE DE COERÊNCIA E NÍVEL DE RUÍDO.....	43
3.2.3	DADOS RECUPERADOS EM DIFERENTES LINHAS DE VISADA.....	43
3.2.4	TRATAMENTO DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE MONITORAMENTO TRADICIONAL: ETR.....	44
3.2.5	ESTUDO DE COMPARAÇÃO DE DADOS INSAR E ETR.....	45
3.3	VALIDAÇÃO E POTENCIAL DE USO DO MONITORAMENTO POR RADAR ORBITAL INSAR.....	46
4	RESULTADOS	49
4.1	ANÁLISE DE APLICABILIDADE.....	49
4.2	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE - ESTUDO DE CASO.....	60

4.2.1	ANÁLISE DE COERÊNCIA E NÍVEL DE RUÍDO	61
4.2.2	DADOS RECUPERADOS EM DIFERENTES LINHAS DE VISADA	65
4.2.3	TRATAMENTO DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE ETR	68
4.2.4	COMPARAÇÃO DE DADOS INSAR E PRISMAS DE MONITORAMENTO.....	70
4.3	VALIDAÇÃO E POTENCIAL DE USO DO MONITORAMENTO POR RADAR ORBITAL INSAR.....	79
5	CONCLUSÕES	83
5.1	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Matriz de classificação quanto à CRI, EC (ANM, 2023).	7
Tabela 2-2 - Principais causas associadas aos modos de falha de barragens (Tavares, 2020). 12	
Tabela 2-3 - Parâmetros monitorados e modos de falha (Pimentel <i>et al.</i> , 2021).	14
Tabela 2-4 – Resumo dos pontos importantes apresentados acerca do Radar Orbital InSAR. 28	
Tabela 4-1 - Aplicabilidade do monitoramento via InSAR x detecção de possíveis causas precursoras dos principais modo de falha.	50
Tabela 4-2 - Aplicabilidade do monitoramento via InSAR x detecção de possíveis anomalias em uma barragens de terra.	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Quantitativo de barragens por DPA, abrangidas pela PNSB (ANM, 2023)	5
Figura 2-2 Quantitativo de barragens por Nível de Emergência (ANM, 2023).....	6
Figura 2-3 – Representação esquemática de anomalias mais frequentes (ANA, 2016, adaptado de Roque e Comissão, 2001).	8
Figura 2-4 – Estatísticas históricas de causas de ruptura de barragens para 10 países, 1915-2016 (modificado de Clarkson & Williams, 2021a).	9
Figura 2-5 - Monitoramento de estruturas de disposição de rejeitos (IBRAM, 2019).....	13
Figura 2-6 – Exemplo de sistemas de monitoramento exagerado, balanceado e ineficiente (modificado de Sharon & Eberhardt, 2020).	15
Figura 2-7 – Satélites em órbita na Terra (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).	17
Figura 2-8 – Órbitas ascendente e descendente do satélite (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).....	18
Figura 2-9 – Linha de visada do satélite e detecção de movimentação temporal (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).....	19
Figura 2-10 – Relação entre o deslocamento do solo e a mudança de fase do sinal (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).	20
Figura 2-11 – Abordagem SqueeSARTM (PS e DS) (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).	21
Figura 2-12 – Exemplo de sensor de observação lateral e micro-ondas emitidas pelo sensor (Sharon & Eberhardt, 2020).....	22
Figura 2-13 – Encurtamento de rampa (foreshortening, F), inversão de relevo ou superposição (layover, L) e sombreamento (shadowing, S) (modificado de Alaska Satellite Facility, 2023).	23
Figura 2-14 – Órbitas ascendente e descendente e decomposição de pontos homólogos: direção EW e vertical de movimentação (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).	25
Figura 2-15 – Instalação do Corner Reflector em campo (TRE-ALTAMIRA, 2023b).....	26
Figura 2-16 – Funcionamento do Corner Reflectors (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023b).	26
Figura 2-17 – Série temporal de deslocamento do terreno (PS) e Corner Reflectors (CR), marcado em triângulo no mapa, no verão e inverno (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023b).	27
Figura 2-18 – Foto aérea da falha e dimensões estimadas (Thomas et al., 2019).....	29

Figura 2-19 – Dados do InSAR, obtidos da órbita descendente do Sentinel 1, mostrando deformação precursora à falha na barragem da mina de ouro de Cadia (modificado de Carlà et al., 2019).....	30
Figura 2-20 – Mapa de deslocamento da região do deslizamento de terra Maoxian e séries temporais de deslocamento de pontos selecionados na região de maiores velocidades. Dados do Sentinel 1, órbita descendente. (modificado de Intrieri et al., 2018).	31
Figura 2-21 – Mapa e linhas de tendências dos dados (órbita descendente, Sentinel 1) das áreas com diferentes comportamentos cinemáticos (modificado de Intrieri et al., 2018).	32
Figura 2-22 – Estação Total Robótica modelo TM50 (Leica Geosystem, 2023) e instalação em edificação de proteção posicionada em terreno estável (Hawley et al., 2009).....	33
Figura 2-23 Sugestão de distribuição espacial de ângulos e distâncias entre uma ETR e prismas de referência (Magalhães et al., 2023).	36
Figura 2-24 – Exemplo de correta instalação de marco geodésico. a) Ferragens das estacas e do pilar devidamente engastadas na ferragem da base. b) Exemplo do marco pronto (IBGE, 2008, adaptada pelo autor).	36
Figura 2-25 – Exemplos de condição dos prismas de monitoramento. a) Boa prática de instalação. b) instalação não indicada (Magalhães et al., 2023).	37
Figura 3-1 – Fluxograma do trabalho.....	38
Figura 3-2 – Fluxograma de trabalho para as análises da aplicabilidade dos dados de InSAR.	40
Figura 3-3 – Fluxograma de trabalho para as análises de confiabilidade dos dados de InSAR.	41
Figura 3-4 – ETR, referencial e prismas de monitoramento instalados na Barragem A.....	42
Figura 3-5 – Prismas de monitoramento instalados na Barragem B.....	42
Figura 3-6 – Visão da tela da planilha de análise.....	46
Figura 3-7 – Visão da tela do software de análise dos dados georreferenciados.	46
Figura 3-8 – Método de classificação em grupo A, B e C de acordo com a orientação da crista das barragens analisadas.....	47
Figura 3-9 – Exemplo de classificação em grupo C de acordo com a orientação da crista da Barragem A, aproximadamente EW.	48
Figura 4-1 – Mapa de coerência dos dados da órbita ascendente (ASC) do monitoramento InSAR para a Barragem A.	61
Figura 4-2 – Mapa de coerência dos dados da órbita descendente (DESC) do monitoramento InSAR para a Barragem A.	62

Figura 4-3 – Intervalo de dias de revisita do satélite para aquisição de dados de InSAR em órbita ascendente e descendente.	63
Figura 4-4 – Mapa e histograma de velocidade de deslocamento nos levantamentos Ascendente e Descendente da área selecionada próxima a Barragem A.	64
Figura 4-5 – Histogramas de variação da amplitude dos dados para a área selecionada de acordo com a sazonalidade - órbita ascendente.	64
Figura 4-6 – Levantamento orbital ascendente e descendente de deslocamentos para a Barragem A.	65
Figura 4-7 – Levantamento orbital de deslocamento EW e Vertical para a Barragem A.	67
Figura 4-8 – Saltos ocasionados por motivos externos à estrutura geotécnica sinalizados nos dados do referencial e prismas de monitoramento (em vermelho no mapa).	69
Figura 4-9 – Dados reprocessados dos prismas de monitoramento, sem saltos por motivos externos à estrutura geotécnica.	70
Figura 4-10 – Deslocamento vertical acumulado da Barragem A – InSAR e prismas de monitoramento.	71
Figura 4-11 – Velocidade de deslocamento vertical (mm/ano) da Barragem A – InSAR e prismas de monitoramento.	71
Figura 4-12 – Série temporal de deslocamento vertical de quatro prismas exemplo selecionados no barramento e do ponto do InSAR localizado mais próximo de cada prisma – Barragem A.	72
Figura 4-13 – Deslocamento leste-oeste acumulado da Barragem A – InSAR e prismas de monitoramento.	73
Figura 4-14 – Velocidade de Deslocamento leste-oeste (mm/ano) da Barragem A – InSAR e prismas de monitoramento.	73
Figura 4-15 – Série temporal de deslocamento EW de quatro prismas exemplo selecionados no barramento e do ponto do InSAR localizado mais próximo de cada prisma – Barragem A. ..	74
Figura 4-16 – Diferença de deslocamento Vertical Acumulado – InSAR e prismas de monitoramento da Barragem A.	75
Figura 4-17 – Diferença de deslocamento Leste-oeste Acumulado – InSAR e prismas de monitoramento da Barragem A.	76
Figura 4-18 – Velocidade de deslocamento vertical e EW (mm/ano) da Barragem B – InSAR e prismas de monitoramento.	77
Figura 4-19 – Série temporal de deslocamento vertical de prismas e ponto do InSAR selecionado próximo - Barragem B.	78

Figura 4-20 – Série temporal de deslocamento leste-oeste de prismas e ponto do InSAR selecionado próximo - Barragem B.....	79
Figura 4-21 – Orientação da crista das 42 barragens, representadas por diferentes cores e dividida em 3 grupos.	81
Figura 4-22 – Classificação das 42 barragens em três grupos de acordo com a orientação da crista.	81

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANM – Agência Nacional de Mineração

ASC – Ascendente

CRI – Categoria de Risco

CR – *Corner Reflector* (Refletores de Canto)

DESC - Descendente

DPA – Dano Potencial Associado

DS - *Distributed Scatterer* (Dispensor Distribuído)

EC – Estado de Conservação

EIR - Extrato de Inspeção de Segurança Regular

ETR – Estação Total Robótica

EW – Leste-oeste

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

InSAR - Interferometria de Radar de Abertura Sintética

ISR - Inspeção de Segurança Regular

LOS – *Line of Sight* (Linha de Visada)

NE – Nível de Emergência

PS - *Persistent Scatterers* (Dispersores Persistente)

PSB – Plano de Segurança de Barragens

RISR - Relatório de Inspeção de Segurança Regular

SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração

ZAS – Zona de Auto Salvamento

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório, é apresentado a importância e a justificativa desta pesquisa, assim como os objetivos gerais e específicos. Adicionalmente, é descrito a estrutura desta dissertação.

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Para monitoramento de movimentos em grandes áreas, o uso de instrumentos geotécnicos tradicionais, comumente de localização pontual, constitui uma limitação devida à sua baixa abrangência. Avanços tecnológicos do sensoriamento remoto permitem a captura de uma imagem de radar da superfície do terreno, que é comparada com imagens registradas em diferentes momentos para obter uma possível movimentação. As características significativas desta técnica, Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR), são que a imagem pode cobrir uma área de até 2.500 km², os movimentos relativos podem ser medidos de forma milimétrica e as medições são independentes do clima, cobertura de nuvens e luz do dia (Wyllie, 2018).

O Radar Orbital InSAR já era utilizado na mineração brasileira para projetos de exploração e estudos topográficos, porém ganhou grande visibilidade para fins de monitoramento de barragens principalmente após os recentes episódios de ruptura, Barragem do Fundão em Mariana e Barragem 1 em Brumadinho, nos anos de 2015 e 2019, respectivamente. A capacidade de cobrir extensas áreas, o custo relativamente baixo, a possibilidade de monitoramento em áreas inacessíveis e a necessidade de redundância de monitoramento foram pontos determinantes que levaram inúmeras estruturas geotécnicas a serem monitoradas pela tecnologia de radar orbital, identificando deslocamentos superficiais que possam ser precursores de instabilidade e outras anomalias. Além disso, a técnica InSAR também tem se mostrado eficiente em apontar locais adequados para instalação de monitoramentos complementares, como prismas e radares terrestres. Pode-se citar também a vantagem de ser um método não intrusivo de avaliação.

Porém, como qualquer outra tecnologia, esta técnica também possui limitações que precisam ser conhecidas para a correta compreensão de seus resultados. A linha de visada e o tempo de revisita do satélite, a geometria da estrutura, vegetação, existência de água ou umidade e obras em andamento podem ser considerados como pontos limitantes na utilização dessa tecnologia. Por ser uma técnica de recente aplicação no monitoramento de barragens, a bibliografia nacional ainda é escassa, o que acarreta pouco conhecimento acerca desse monitoramento e

pouca utilização. Nesse sentido, a confiabilidade dos dados entregues e a aplicabilidade é muitas vezes questionada ou mal interpretada.

Considerando que todo instrumento deva ser selecionado e instalado para responder à questões específicas em um monitoramento, se não há perguntas, não deveria haver instrumentação. Porém há uma tendência histórica errônea de selecionar, instalar e realizar medições em instrumentos para depois pensar em sua aplicabilidade (Silveira, 2003). Assim, a utilização de novas tecnologias de monitoramento sem critério e sem definição de função específica fez com que várias dessas fossem instaladas e utilizadas para monitorar sem definir exatamente o que se está monitorando.

Dessa forma, fez-se necessário a análise da capacidade de entrega do Radar Orbital InSAR, no sentido de aplicabilidade em detecção de deslocamentos que podem ser precursores de diferentes modos de falha e no monitoramento de anomalias, considerando também a capacidade da velocidade de resposta à essas detecções, o tipo de monitoramento entregue e as limitações da técnica.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desse estudo consiste na análise da aplicabilidade e confiabilidade técnica dos dados de deslocamentos superficiais obtidos por radar orbital InSAR para o monitoramento de barragens de mineração. Já os objetivos específicos são:

- Apresentar estudos de casos bibliográficos, as vantagens e desvantagens do uso da técnica InSAR, a qualidade do dado, os tipos de informação gerada, as limitações da tecnologia, focando principalmente no monitoramento de barragens, visando contribuir para novas perspectivas quanto ao uso de Radar Orbital InSAR para o monitoramento de barragens de mineração.
- Avaliar e correlacionar a capacidade de entrega do InSAR, considerando as limitações técnicas, espaciais e temporais com a aplicabilidade desse monitoramento na identificação de possíveis causas dos principais modos de falha e de possíveis anomalias.
- Apresentar o método de análise dos dados de InSAR e aplicar em estudo de caso em uma barragem de mineração, por meio dos dados derivados dos satélites da constelação COSMO-SkyMed.

- Apresentar análise de comparação de dados para dois estudos de caso por meio de comparação dos dados obtidos do InSAR (COSMO-SkyMed) e de ETR (Estação Total Robótica).
- Analisar as orientações das cristas de 42 barragens, visando um maior entendimento do panorama dessa distribuição e da aplicabilidade do dado de decomposição vetorial do InSAR para essas diferentes situações.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. No primeiro capítulo, é apresentado o problema que motivou a realização desta pesquisa e a relevância desse estudo no contexto da mineração. Posteriormente, são descritos os objetivos gerais e específicos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, descrevendo os fundamentos teóricos estudados e considerados relevantes para a pesquisa, iniciando-se pela contextualização da legislação brasileira, cenário atual de monitoramento de barragens e principais modos de falha dessas estruturas geotécnicas. Posteriormente, são apresentados os fundamentos teóricos do Radar Orbital InSAR, principal técnica de monitoramento em estudo, e a aplicação dessa técnica em dois estudos de caso de rupturas. Este capítulo também abrange os fundamentos teóricos de outra tecnologia utilizada no estudo, a ETR.

No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos adotados na presente pesquisa por meio de fluxogramas. São detalhadas as etapas metodológicas para os principais objetivos do estudo: análise da aplicabilidade dos dados do InSAR, análise da confiabilidade dos dados do InSAR e por fim, a validação e potencial de uso desse monitoramento. Cada etapa conta com subdivisões e objetivos específicos a serem alcançados.

No Capítulo 4 são discutidos os resultados alcançados na pesquisa. Primeiramente, são apresentadas as tabelas elaboradas para a definição da aplicabilidade dos dados do Radar Orbital InSAR e, posteriormente, os resultados da análise da confiabilidade dos dados do InSAR, por meio de estudos de caso de comparação de dados. O capítulo conta também com os resultados da análise de potencial de uso do monitoramento por essa técnica.

O Capítulo 5 sintetiza as conclusões da presente pesquisa, juntamente com algumas sugestões para pesquisas futuras. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a contextualização da legislação brasileira para monitoramento de barragens e os principais modos de falha dessas estruturas. Posteriormente, são detalhados os fundamentos teóricos do Radar Orbital InSAR e a aplicação desse monitoramento em casos de rupturas de estruturas. Por fim, são explicados os fundamentos teóricos de outra tecnologia utilizada no estudo, a ETR. Assim, o objetivo principal deste capítulo é abordar os conceitos essenciais utilizados durante o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO

A produção mineral contribui para sustentar a civilização e possibilitar seu desenvolvimento, dado que muito do que é produzido ou utilizado atualmente é derivado ou tem insumos derivados da mineração. Diversas estruturas geotécnicas podem ser encontradas em uma mina, como cavas, pilhas e barragens. As barragens são estruturas de armazenamento de líquidos, sólidos ou uma mistura de ambos, podendo ser utilizadas para contenção de sedimentos e armazenamento de água ou de rejeitos resultantes do processo de beneficiamento.

Com os recentes episódios de ruptura no Brasil, Barragem do Fundão em Mariana em 2015 e Barragem 1 em Brumadinho em 2019, ocorreram diversas mudanças nas legislações vigentes. Os proprietários de barragens devem promover as ações necessárias à garantia da segurança de suas barragens, com a realização de monitoramento e manutenção, incluindo a avaliação periódica de segurança e a realização de inspeções de segurança regulares (ANM, 2023).

O empreendedor é obrigado a implementar um sistema de monitoramento de segurança de barragens, de acordo com o Dano Potencial Associado (DPA) e com o nível de complexidade da estrutura. Quando classificadas com DPA alto, o empreendedor é obrigado a manter um sistema de monitoramento automatizado de instrumentação, com acompanhamento em tempo real e integral, incluindo redundância no sistema de alimentação de energia, seguindo os critérios definidos pelo projetista, sendo de responsabilidade do empreendedor a definição da tecnologia, dos instrumentos e dos processos de monitoramento. Além disso, as informações advindas do sistema de monitoramento, devem estar disponíveis para as equipes ou sistemas da Agência Nacional de Mineração (ANM) e das Defesas Civas (ANM, 2023).

A Figura 2-1 apresenta o quantitativo de barragens por DPA de todas as Barragens de Mineração abrangidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), referente aos dados disponíveis até novembro de 2023 (ANM, 2023). Para uma barragem estar sujeita à

PNSB, deve apresentar pelo menos uma das seguintes características: altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros, capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos), reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis, DPA médio ou alto, e categoria de risco (CRI) alto (ANM, 2023). Atualmente, segundo a ANM (2023), 268 barragens são classificadas como DPA alto e 151 como DPA médio.

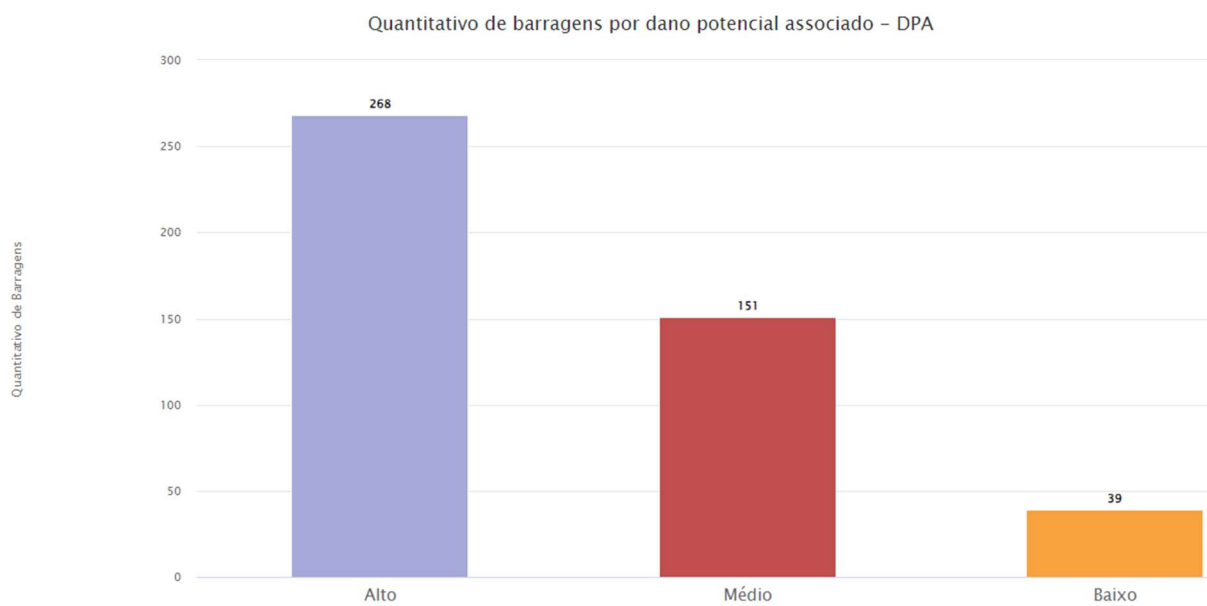


Figura 2-1 Quantitativo de barragens por DPA, abrangidas pela PNSB (ANM, 2023)

Com base nos critérios estabelecidos pelo Decreto Estadual 48.140/2021 (Minas Gerais, 2021), as barragens devem ser periodicamente classificadas de acordo com a CRI e potencial de dano ambiental. A classificação por CRI é definida de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente ou desastre, considerando as características técnicas, o método construtivo, o estado de conservação (EC), a idade do empreendimento e atendimento ao Plano de Segurança da Barragem (PSB).

Situações de emergência em potencial, que possam comprometer a segurança de uma barragem, definem um possível Nível de Emergência (NE) dessa estrutura. A barragem de mineração que apresentar CRI alto será enquadrada em algum Nível de Emergência estabelecido no art. 41º da Resolução ANM Nº 130/2023. Caso a estrutura seja classificada como Nível de Emergência 3 (NE3), o empreendedor é obrigado a alertar a população potencialmente afetada na ZAS (Zona de Alto Salvamento) de forma rápida e eficaz, objetivando sua evacuação, assim como informar

à Defesa Civil e à ANM (ANM, 2023). Há mineradoras que realizam a evacuação preventiva da ZAS em Nível de Emergência 2 (NE2) (VALE SA, 2023).

A Figura 2-2 apresenta o cenário geral de todas as Barragens de Mineração, incluídas e não incluídas no PNSB, considerando o nível de emergência, referente aos dados disponíveis pela ANM (2023) até novembro de 2023. Observa-se que 8 barragens no Brasil estão atualmente em NE02 e NE03, 54 em NE01, 27 Nível de Alerta e 837 sem emergência.

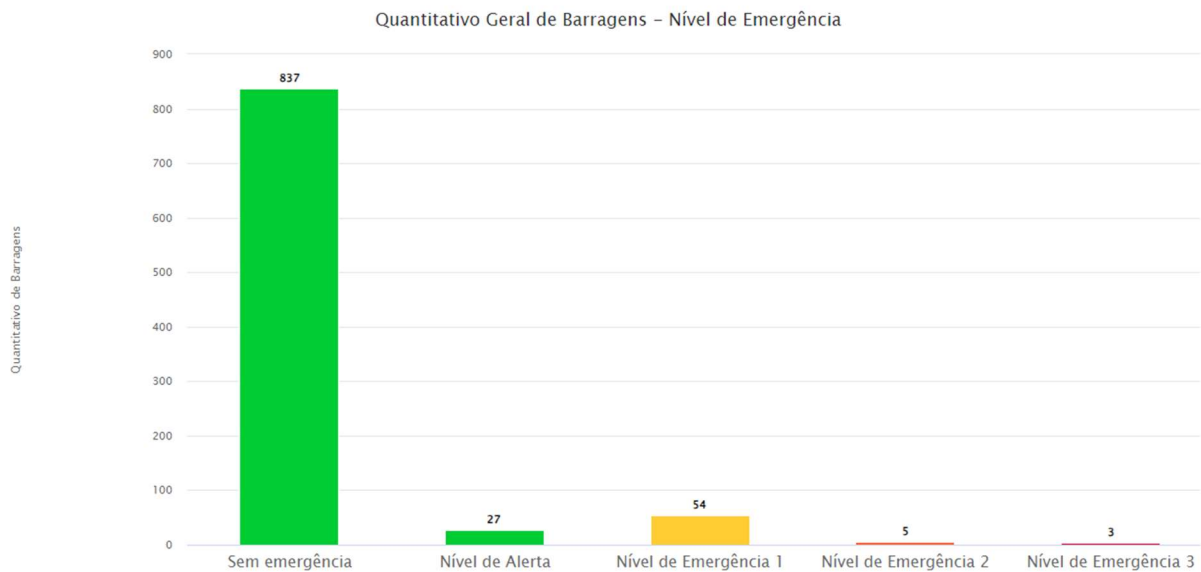


Figura 2-2 Quantitativo de barragens por Nível de Emergência (ANM, 2023)

Para o atendimento à PNSB, referente às barragens fiscalizadas pela ANM, as mineradoras, responsáveis pela Inspeção de Segurança Regular (ISR) de barragens devem emitir, quinzenalmente, o EC dessas estruturas sob sua gestão, visto que essas informações definem a CRI. São preenchidas fichas de ISR, as quais alimentam o Extrato de Inspeção de Segurança Regular (EIR), inserido quinzenalmente no SIGBM (Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração), contendo o resumo das informações relevantes dessas fichas e eventuais informações solicitadas no sistema. As fichas de ISR alimentam também o Relatório de Inspeção de Segurança Regular (RISR), emitido semestralmente, que apresenta um diagnóstico visual das condições geotécnicas atuais de segurança, o quadro do EC da estrutura, avaliação da instrumentação e recomendações gerais (ANM, 2023).

Com relação ao EC são avaliados cinco quesitos, conforme a Tabela 2-1, sendo esses: a confiabilidade de estruturas extravasoras, possíveis percolações, possíveis deformações e recalques que podem comprometer a segurança da estrutura, considerando trincas e

abatimentos, deterioração dos taludes e paramentos, incluindo erosão, escorregamentos e sulcos e por fim, a drenagem superficial (ANM, 2023).

Tabela 2-1 - Matriz de classificação quanto à CRI, EC (ANM, 2023).

QUADRO 3 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)				
1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC				
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (k)	Percolação (l)	Deformações e Recalques (m)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (n)	Drenagem Superficial (o)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)	Drenagem superficial existente e operante (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou urgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)	Existência de trincas e/ou assoreamento e/ou abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias, sem restrição operacional e extravasor com capacidade plena (6)	Umidade ou urgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)	Existência de trincas e/ou assoreamento e/ou abatimentos sem medidas corretivas em implantação (4)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Drenagem superficial inexistente (5)
EC = \sum (k até o)				

Logo, a inspeção visual é algo indispensável e recorrente em um monitoramento de barragens. O Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem (ANA, 2016) descreve a necessidade das inspeções com o objetivo de analisar a condição visual da estrutura e detectar possíveis anomalias. A Figura 2-3 apresenta as anomalias mais frequentes, como fissuras, surgências, instabilidade de taludes, depressões, recalques localizados ou afundamentos, proteção deficiente dos taludes, erosão superficial, ocorrência de árvores, arbustos e tocas de animais. Essas anomalias podem evoluir para situações emergenciais e, influenciar no EC de uma barragem, podendo ser possíveis precursores de modos de falha, por isso, é importante a detecção em fase inicial e constantes acompanhamentos.

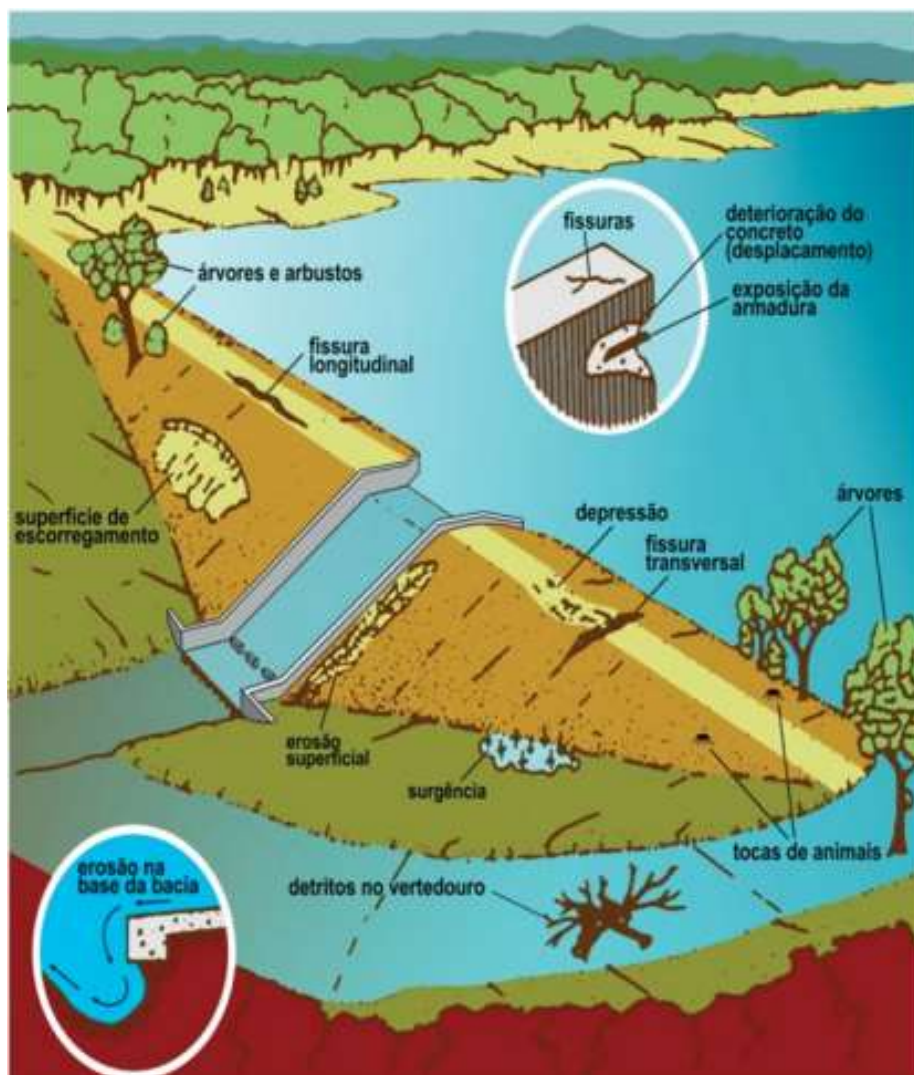


Figura 2-3 – Representação esquemática de anomalias mais frequentes (ANA, 2016, adaptado de Roque e Comissão, 2001).

Considerando os tópicos avaliados durante as análises e inspeções descritas anteriormente, a instrumentação geotécnica é um forte instrumento para predição e detecção de comportamentos que podem ser precursores de anomalias que vão interferir no EC da estrutura. Dado que todo instrumento deva ser selecionado e instalado para responder a questões específicas em um monitoramento (Silveira, 2003), faz-se necessário a identificação de tecnologias que podem suportar o monitoramento dessas possíveis anomalias.

Nesse sentido, a redundância de dados também se faz importante e é muito requisitada por consultores e auditores, principalmente para verificar e reforçar tendências de monitoramento, bem como fornecer uma fonte de dados substitutos em caso de falha de um sistema. A redundância de dados deve ser obtida a partir de diferentes tipos de instrumentos, uma vez que caso dois sistemas diversos indiquem o mesmo comportamento físico, esse provavelmente será

real. Por exemplo, caso prismas e radares orbitais indicarem deslocamentos similares, isso indicaria fortemente que o deslocamento real está ocorrendo (Sharon & Eberhardt, 2020).

Assim, a técnica InSAR pode ser aplicada na detecção de deslocamentos superficiais, que podem ser precursores de anomalias como deformações e recalques e deterioração dos taludes ou paramentos, influenciando no EC da estrutura, além de precursores de potenciais modos de falha.

2.2 PRINCIPAIS MODOS DE FALHA EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO E PROGRAMA DE MONITORAMENTO

A falha de um barramento pode ser definida como a perda da sua função principal, ou seja, a perda da capacidade de reservar, acarretando liberação sem controle do material contido no reservatório para jusante, devido a aspectos de integridade estrutural ou por meio do colapso total ou parcial da barragem (Tavares, 2020).

A análise de um extenso banco de dados relativo as rupturas de barragens de rejeitos entre 1915 até 2016, categorizado por país e características de falha, apresenta os terremotos como a maior causa de ruptura, principalmente devido ao elevado número de eventos que ocorreram no Chile, conforme Figura 2-4. Em seguida, considerando os 10 países estudados, a causa de falha em ordem de prevalência são galgamento (17%), instabilidade de taludes (14%), percolação (11%) e falha de fundação (9%) (Clarkson & Williams, 2021a).

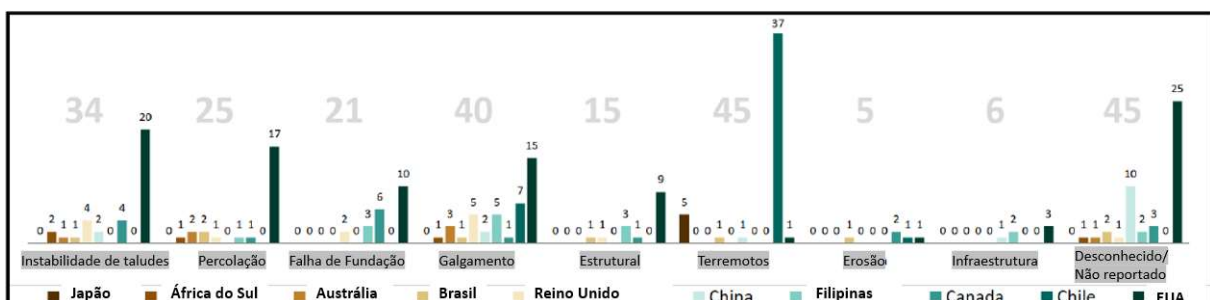


Figura 2-4 – Estatísticas históricas de causas de ruptura de barragens para 10 países, 1915-2016 (modificado de Clarkson & Williams, 2021a).

Dentre as causas mais frequentes de ruptura de barragem, está o galgamento, que pode ocorrer devido a vazões excessivas, mau funcionamento ou capacidade insuficiente do vertedouro ou estruturas de saída, recalque da barragem, deslizamento externo de terra no reservatório ou por ondas causadas pelo vento (Adamo *et al.*, 2020).

Um controle crítico para monitorar o galgamento é a gestão da água. Observações diretas como posição e tamanho da lagoa de decantação e observações relativas aos requisitos de borda livre, situação dos sistemas de detecção de vazamentos, medição automática de vazão e funcionalidade desses equipamentos, condição dos sistemas de bombas, tubulações e vertedouros ajudam na detecção precoce de falhas ou anormalidades em relação às condições previstas. Durante a operação diária, também é importante monitorar o clima, a ação das ondas e a taxa de enchimento (Clarkson & Williams, 2021a).

Defeitos de fundação e instabilidade de taludes, são outras causas principais de rupturas. As deteriorações da desempenho e das características da fundação da barragem podem gerar efeitos catastróficos para o restante da estrutura, independentemente da estabilidade da barragem. Algumas características que podem contribuir para isso, e são possíveis de serem investigadas na fase de projeto, são as estruturas geológicas e características do material da fundação, como resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade, presença de solos argilosos sem coesão, dispersivos ou moles, superfícies de deslizamento e fissuras no solo/rocha. Outras características que possam ser difíceis de investigar na fase de projeto, mas também podem contribuir para a falha da fundação são dolinas, poços antigos e pontos fracos acima de minas subterrâneas ativas, além de feições localizadas, como vazios cársticos (Clarkson & Williams, 2021a).

Em uma inspeção visual, a avaliação das condições da fundação pode ser feita, por exemplo, por meio da identificação de umidade em dias secos, água corrente, existência de bolhas de água e acúmulo de lodo. No caso de monitoramento, é importante analisar diversos parâmetros e instrumentos, como piezômetros para medição de poropressão e fluxos preferenciais, inclinômetros e medidores de recalque e marcos topográficos para entender o perfil de assentamento, analisando possível instabilidades (Clarkson & Williams, 2021a).

Com relação ao modo de falha instabilidade de taludes, o monitoramento da inclinação do aterro de uma barragem é importante para uma possível identificação precoce dessa falha. Dados de monitoramento históricos também são cruciais, pois variações inesperadas, como aumento na velocidade de deslocamentos, podem indicar um comportamento anômalo. A observação direta ou por meio de instrumentação de fissuras na crista ou face do talude, assentamento da crista, alteração da umidade do solo, infraestrutura e fundações danificadas, mudança nos níveis de água e a qualidade da água a jusante podem ajudar na previsão da instabilidade do talude (Fell *et al.* 2015; Clarkson *et al.*, 2021b).

A erosão interna devido a um caminho aberto e contínuo de infiltração, como o *Piping*, que atua como um caminho de fluxo desprotegido e preferencial, é outro modo principal de ruptura de barragens. Sempre que a água é represada por aterros de terra, as partículas são expostas a um gradiente hidráulico e pressões de percolação. A percolação é normalmente esperada e não necessariamente se apresenta como um problema, desde que seja controlada. Onde o gradiente hidráulico e a velocidade são suficientes para superar a estabilidade da estrutura do solo, as partículas podem começar a se desprender, mover e migrar através do aterro, fundação ou próximo a interfaces com outras estruturas, tais como pilares e galerias (Clarkson & Williams, 2021a).

O monitoramento da percolação, seja por inspeção visual ou instrumentação, é um meio de identificar se ocorreu erosão interna. A maioria dos indicadores pode ser observado visualmente, como surgências, sumidouros, assentamentos, redemoinho no reservatório e bolhas no solo. A menos que a instrumentação instalada intercepte exatamente a superfície de ruptura ou uma erosão natural na face do talude, a erosão interna é muito difícil de identificar. No entanto, mudança na poropressão e nível de água, assentamento da crista, instabilidade do talude e surgência de água no talude de jusante podem ser indicativos desse mecanismo e monitorados por instrumentação. No caso de identificação de indicadores de erosão interna observados visualmente, a falha provavelmente já progrediu, sendo necessária intervenção e remediação imediata (Fell *et al.* 2015). Métodos geofísicos não invasivos, como eletroressistividade e potencial espontâneo (SP), têm sido experimentados para detectar a presença de caminhos preferenciais de fluxo de água (canais de *piping*) que possam ter se desenvolvido no solo. Em termos de redundância, a associação destes métodos geofísicos e outros (por exemplo, GPR e sísmica) é interessante para um melhor diagnóstico do fenômeno.

Outro modo de falha principal é a liquefação, ruptura ocorrida em maciços apoiados ou constituídos por materiais susceptíveis ao fenômeno. Em solos, com o acréscimo da poropressão concomitante com a redução das tensões efetivas, ocorre a ação de transformar o estado sólido no estado liquefeito. Essa transformação decorre da brusca aplicação de uma determinada carga, que pode ter origem estática ou dinâmica. A sismicidade pode induzir carregamento dinâmico, de curto prazo e cíclico, que ocorre nas direções horizontal e vertical, este movimento tem o potencial de desestabilizar o aterro de barragens de rejeitos, propagar trincas internas ou induzir o aumento da poropressão e, assim, estimular a liquefação em diferentes materiais (Fell *et al.*, 2015; Tavares, 2020; Clarkson & Williams, 2021a).

A Tabela 2-2 apresenta resumidamente os quatro dos principais modos de falha de uma barragem, suas possíveis causas e descrição do problema segundo Tavares (2020).

Tabela 2-2 - Principais causas associadas aos modos de falha de barragens (Tavares, 2020).

Modo de Falha	Componente	Causa	Descrição do problema
Galgamento	Reservatório	Volume para trânsito de cheias insuficiente	Volume insuficiente devido aos assoreamentos/ enchimento do reservatório com sedimento ou rejeito.
	Reservatório	Instabilização dos taludes no entorno do reservatório	Rompimento de um talude no entorno do reservatório ocasionando assoreamento no reservatório, ou até mesmo, ocupação do reservatório e ondas que possam galgar o maciço
	Sistema extravasor	Capacidade de descarga insuficiente	Capacidade de descarga insuficiente devido ao subdimensionamento do sistema extravasor ou obstrução do mesmo.
	Maciço	Deformação excessiva	Deformações superiores às almejadas nos dimensionamentos, com o recalque da crista e redução da borda livre
Instabilização	Maciço/ Fundação	Baixa Resistência dos materiais	Materiais com baixa resistência condicionantes para a estabilidade da estrutura.
	Maciço	Poropressão elevada	Poropressões superiores as almejadas de projeto, causadas pela falha do sistema de drenagem interna.
	Maciço	Erosões	Problemas que podem ser causados por falha ou inexistência do sistema de drenagem superficial
	Maciço/ Fundação	Sismo natural ou induzido	Ocorrência de sismos naturais ou induzidos de magnitudes excepcionais (detonações, tráfego de equipamentos pesados, ruptura de taludes ou pilhas adjacentes).
Piping (erosão interna)	Maciço/ fundação	Ausência de drenagem interna	Ausência de sistema de drenagem interna, permitindo o carreamento de partículas de solo
	Maciço/ fundação	Sistema de drenagem interna existente ineficiente	Sistema de drenagem interna ineficiente, permitindo o carreamento de partículas de solo
	Maciço	Deformações excessivas, com trincas	Formação de trincas internas e recalques diferenciais, criando caminhos preferenciais dentro do maciço.
	Maciço/ fundação	Materiais com potencial de erodibilidade ou instabilidade interna (sufusão)	Existência de materiais instáveis, ou seja, que não sejam auto cicatrizantes
	Maciço/ Fundação	Zona de alta permeabilidade e/ou ausência no tratamento de fundação	Fluxo concentrado em regiões de alta permeabilidade
	Maciço/ Fundação	Materiais enterrados	Fluxo concentrado no contato do solo com concreto (ou outro Material).
Liquefação	Maciço/ Fundação	Carregamento rápido	Geração de excesso de poropressão causada por carregamento rápido em materiais susceptíveis a liquefação
	Maciço/ Fundação	Abalo sísmico ou vibrações induzidas	Geração de excesso de poropressão causada por abalo sísmico em materiais susceptíveis a liquefação
	Maciço/ Fundação	Aumento das tensões cisalhantes	Aumento das tensões cisalhantes causadas por remoção de materiais no pé da estrutura, gerando excesso de poropressão nos materiais susceptíveis a liquefação

Segundo o IBRAM (2019), a seleção dos principais parâmetros a serem monitorados, os instrumentos para monitoramento e sua localização são definidos em função da complexidade

da estrutura e seus principais modos de falha identificados nas análises de risco, sendo esses galgamento, instabilização, erosão interna, liquefação e contaminação da água ou solo. A Figura 2-5 apresenta os possíveis modos de falha, os objetivos do monitoramento e os possíveis controles.

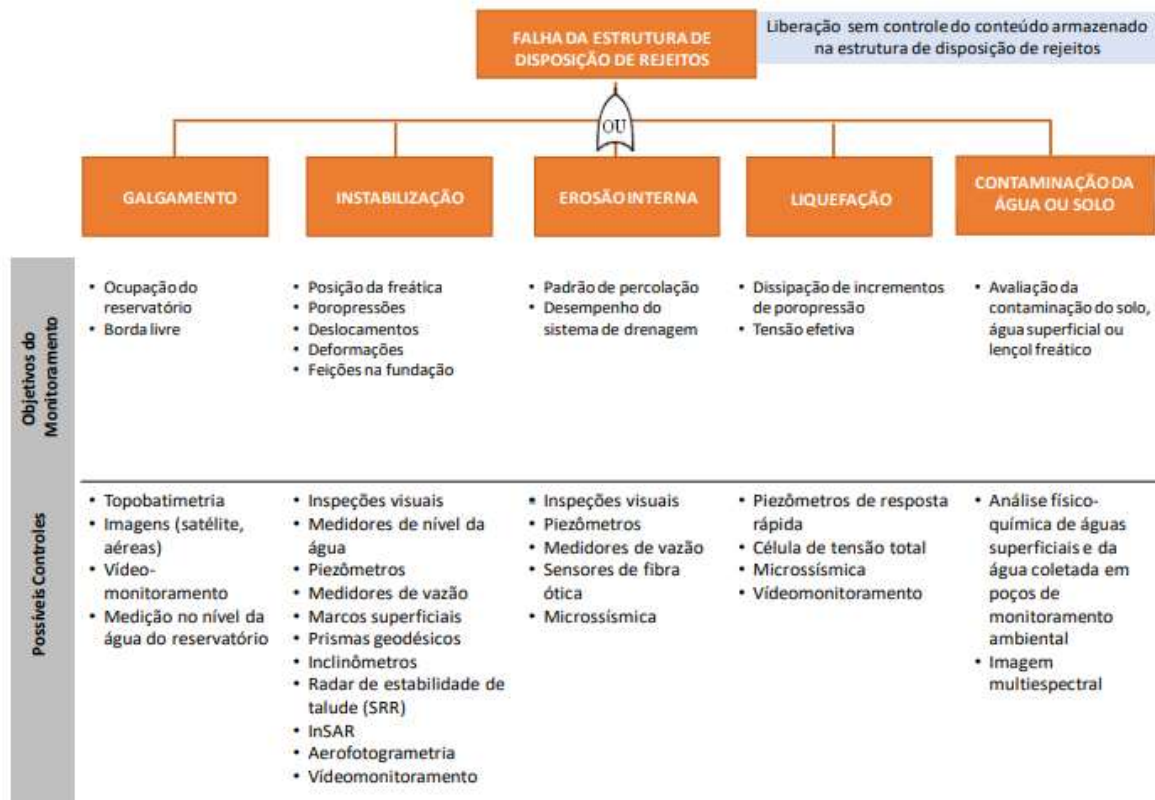


Figura 2-5 - Monitoramento de estruturas de disposição de rejeitos (IBRAM, 2019).

Cada parâmetro monitorado e os modos de falha podem ser correlacionados de forma direta ou como suporte, conforme Tabela 2-3. De acordo com Clarkson *et al.* (2021b), a relação direta fornece uma medição direta dos parâmetros que seriam alterados no caso de uma falha, por exemplo, a instabilidade do talude poderia ser indicada diretamente por uma deformação excessiva. Enquanto a definição de um parâmetro como suporte, fornece uma medição dos parâmetros que podem ser afetados pelo início ou progressão da instabilidade, como por exemplo, o recalque da crista da barragem, considerado como uma deformação, pode também reduzir a borda livre do barramento e propiciar condições para o galgamento (Pimentel *et al.*, 2021).

Tabela 2-3 - Parâmetros monitorados e modos de falha (Pimentel *et al.*, 2021).

Parâmetro Monitorado	Modos de falha					
	Galgamento	Instabilidade de talude	Ruptura de fundação	Erosão Interna	Liquefação estática	Liquefação dinâmica
Nível de água do Reservatório	Direta	Direta	Direta	Direta	Suporte	Suporte
Precipitação	Suporte	Direta/Suporte	Direta/Suporte	Suporte	Suporte	Suporte
Poropressão / Nível de água	-	Direta	Direta	Direta	Direta	Suporte
Percolação (fluxo de água)	-	Suporte	Suporte	Direta	Suporte	Suporte
Deformação e movimento	Suporte	Direta	Direta	Suporte	Suporte	Suporte
Sismicidade e vibração	Suporte	Direta	Suporte	Direta	Suporte	Direta

1- Fluxo de água, gradiente hidráulico, partículas de solo/incremento da turbidez
 2- Recalques, trincas e estufamentos, distorções angulares, deformações e velocidades
 3- Naturais (terremotos) e induzidas por atividades mineiras (desmontes)

No que diz respeito a indicadores diretos de deformação e movimentação, deslocamentos próximos ao pé do talude de jusante da estrutura podem ser indicativos de ruptura da fundação. Considerando indicadores de suporte, o modo de falha erosão interna pode ter como precursor recalques correlacionados com saturação e perda de massa de partículas, além de trincas, por tensão ou recalque diferencial, que podem acarretar o início de um caminho preferencial, “*pipe*”. Com relação ao galgamento, além da perda de borda livre por assentamento da crista, descrito anteriormente, deformação e movimentações no entorno do reservatório podem gerar deslizamento de terra e perda da capacidade de armazenamento, possuindo então, deslocamentos como um indicativo suporte (Clarkson *et al.*, 2021b).

Sendo assim, ressalta-se que o número e o tipo de instrumento devem estar alinhados com os modos de falha esperados e com os recursos apropriados de acordo com os objetivos do programa de monitoramento, para que não ocorra monitoramentos ineficientes ou excessivos, com uma crença equivocada de que a quantidade leva à segurança. A Figura 2-6 exemplifica como são os sistemas de monitoramento com instrumentações de modo exagerado, balanceado ou ineficiente (Sharon & Eberhardt, 2020).

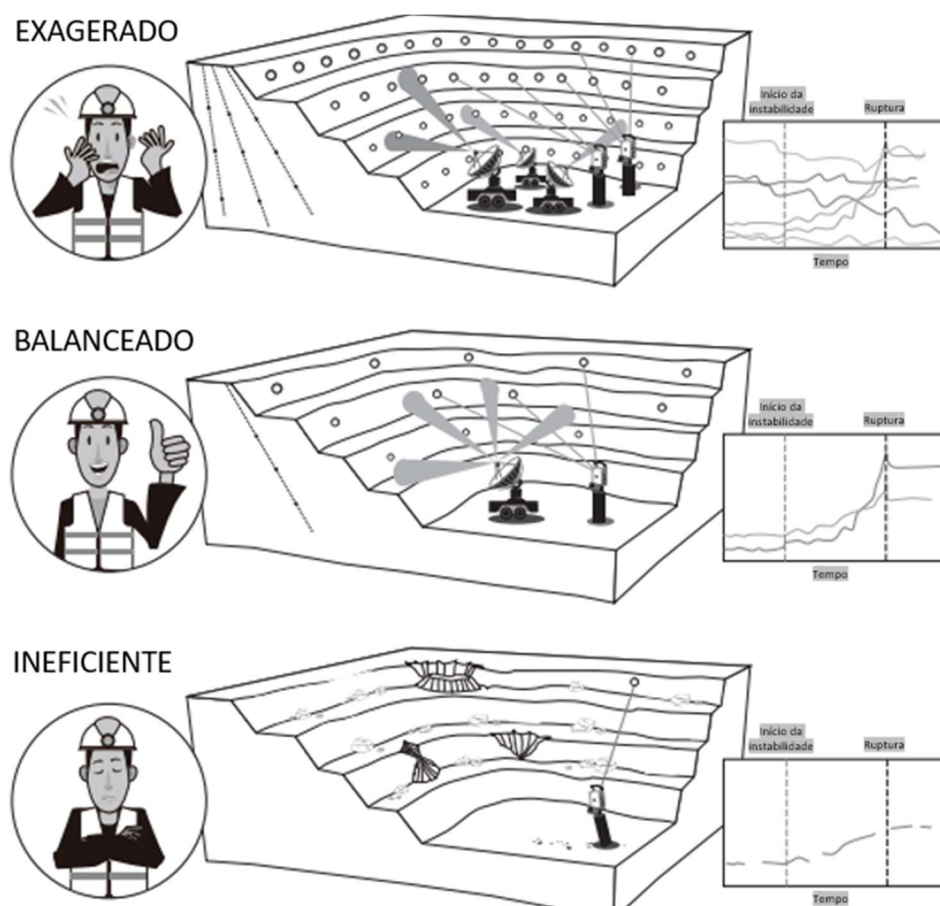


Figura 2-6 – Exemplo de sistemas de monitoramento exagerado, balanceado e ineficiente (modificado de Sharon & Eberhardt, 2020).

Um programa de monitoramento pode ser dividido em duas categorias, monitoramento crítico de segurança e monitoramento estratégico. O monitoramento crítico visa o acionamento de alarmes em caso de identificação de comportamentos anômalos dos parâmetros monitorados, com análise de curto prazo em tempo real ou quase real (segundos a minutos), capaz de detectar mudanças de comportamentos associadas a anomalias e processos de falha na barragem. O monitoramento estratégico é utilizado para acompanhar, a longo prazo (semanas, meses ou anos), a evolução dos parâmetros monitorados com o objetivo de identificar possíveis tendências lentas que devem ser interpretados no âmbito do contexto geotécnico da barragem, sendo suporte da identificação de mecanismos de falha (Pimentel *et al.*, 2021).

Como exemplo de monitoramento crítico pode-se citar o radar terrestre, normalmente usados no monitoramento em tempo real ou quase real para detectar movimentos rápidos, já como exemplo de monitoramento estratégico, tem-se o radar orbital (InSAR), usado para medir deslocamentos lentos ao longo de meses ou anos (Sharon & Eberhardt, 2020).

A compreensão dos modos de falha e dos objetivos do monitoramento permitem direcionar esforços para sinais e dados que indiquem prematuramente a ocorrência ou desenvolvimento dos indícios de um possível estado de falha e permitir o acionamento de alarmes de progressão de tendências ou de emergências. Sendo assim, um programa de monitoramento deve contemplar um monitoramento estratégico para identificar indícios e tendências dos parâmetros relacionados aos possíveis modos de falha, bem como a instrumentação necessária para o monitoramento crítico a ser utilizada em caso de progressão de uma falha (Sharon & Eberhardt, 2020).

Como todas as tecnologias de monitoramento apresentam limitações, a escolha dessas deve privilegiar uma maior abrangência, principalmente em casos de barragens, que em função de particularidades geotécnicas concentradas em diferentes porções do barramento, podem estar sujeitas à diferentes modos de falha. Além disso, é importante a redundância por meio do uso de mais de uma técnica de monitoramento para a confirmação e validação de um determinado comportamento anômalo, visando assim reduzir a possibilidade de alarmes falsos.

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento remoto consiste na aquisição de informação acerca de um objeto sem a necessidade de contato físico. Os sistemas de Radar orbital usam técnicas de imagem da superfície em que a região de interesse é iluminada com ondas eletromagnéticas, com determinada frequência de oscilação, comprimento de onda e amplitude, e o sinal refletido é usado para analisar o comportamento das estruturas geotécnicas. Sendo uma tecnologia de recente utilização, contam com mais de quinze opções de satélites atualmente, com ondas eletromagnéticas em diferentes bandas, principalmente, X, C e L, e com diferentes tempos de revisita, conforme a Figura 2-7 (TRE-ALTAMIRA, 2023a).

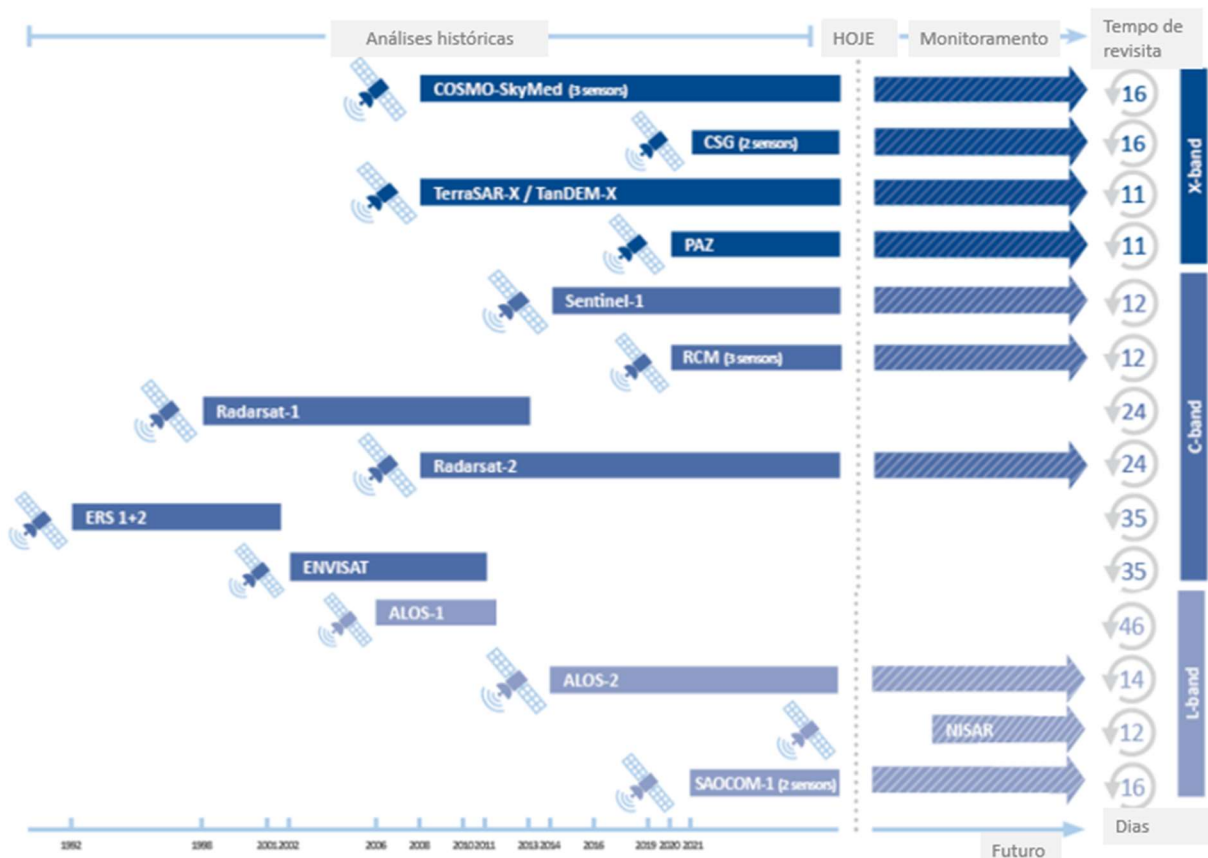


Figura 2-7 – Satélites em órbita na Terra (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).

Nos últimos anos, tem ocorrido um aumento no número de lançamentos de satélites SAR, com consequente aumento de imagens SAR e interferogramas e diminuição do tempo de revisita. Um satélite SENTINEL-1 é capaz de mapear as massas terrestres globais uma vez a cada 12 dias em uma única passagem, ascendente (ASC) ou descendente (DESC), enquanto a constelação de dois satélites oferece um ciclo de repetição exato de 6 dias na linha do equador (Copernicus, 2023a). A missão Copernicus SENTINEL-2, por exemplo, compreende uma constelação de dois satélites em órbita quase polar e tempo de revisita de 10 dias com um satélite e 5 dias com 2 satélites na linha equador (Copernicus, 2023b).

A escolha da banda exerce um papel importante nos resultados, quanto maior o comprimento de onda, mais efetivo é a capacidade de penetração em um material dielétrico e menor a sensibilidade a pequenos deslocamentos. Os sistemas operando em banda X (comprimento de onda de $\lambda=3,1\text{cm}$) fornecem dados com resolução espacial melhor, ou seja, maior densidade de pontos medidos apesar da menor cobertura em área e com precisão milimétrica de taxa deformacional, mas com limitações na detecção de movimentos rápidos entre imagens consecutivas e entre pontos vizinhos (Paradella *et al.*, 2021).

A banda C permite maior cobertura de área, porém com menor resolução espacial, densidade de pontos, e com capacidade de detecção de movimentação mais rápidos, posto que o comprimento de onda usado é maior (~6cm). Os dados em banda L tem cobertura global e são os menos afetados pela decorrelação temporal, mas fornecem menos detalhes de deslocamentos no tempo e no espaço, além de possuírem revisita e resolução espacial piores. A sensibilidade da banda L a deslocamentos de pequena magnitude é menor que nas bandas X e C, sendo a melhor alternativa para monitorar deslocamento de cinemática mais intensa e rápida, ademais, a cobertura espacial de pontos medidos que podem ser detectados em áreas de cobertura vegetal tende a ser muito maior (Paradella *et al.*, 2021).

Os sinais de micro-ondas do radar orbital podem atravessar a atmosfera sem perda relevante de sinal, permitindo a versatilidade de imageamento diurno e noturno, bem como em condição adversas (nuvens, chuvas). Isso é fundamental para o uso do SAR (Radar de Abertura Sintética) no mapeamento de recursos naturais e detecção de mudanças em ambientes tropicais úmidos, particularmente no monitoramento de deformações no terreno pela técnica de interferometria diferencial, que requer uma série temporal de aquisição de imagens (Paradella *et al.*, 2021).

Os satélites seguem órbitas quase polar e síncrona solar, ou seja, o sensor passa repetidamente pelas áreas da Terra no mesmo horário solar local, com altitudes variando entre 500 e 800km e o ângulo entre a direção norte-sul real e a órbita dos sistemas varia ligeiramente dependendo do SAR, mas em geral situa-se no intervalo de até 10°, ou seja, órbitas ascendentes do satélite movendo de sul para norte, possui azimute de visada igual a 80° no Equador (visada para leste) e órbitas descendente com satélite, norte a sul, possui azimute de visada igual 280° no equador (visada para oeste), conforme a Figura 2-8 (Paradella *et al.*, 2021; TRE-ALTAMIRA, 2023a).

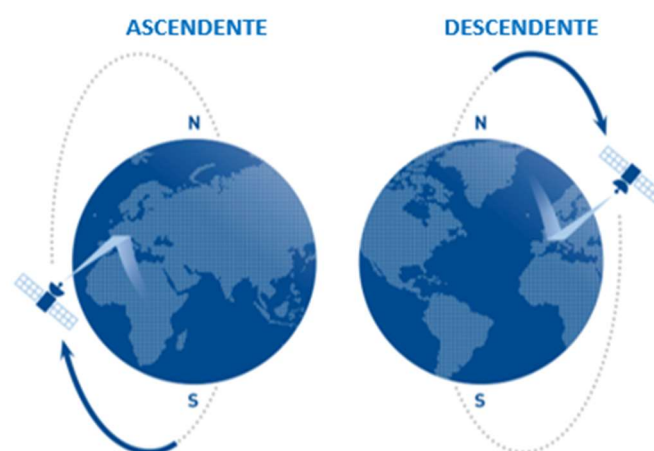


Figura 2-8 – Órbitas ascendente e descendente do satélite (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).

A interferometria SAR (InSAR) é uma técnica que utiliza um par de imagens SAR no formato complexo (amplitude e fase) para gerar uma imagem interferométrica. A fase de cada pixel nessa terceira imagem é formada pela diferença de fase entre os pixels correspondentes nas duas imagens originais obtidas em momentos diferentes. A fase está relacionada à distância sensor alvo e é usada para medir movimentações com taxas mais lentas no tempo. A amplitude está relacionada com a energia de retorno do sinal retroespalhado e é utilizada para medir deformações mais rápidas (Paradella *et al.*, 2021).

Sendo assim, a técnica InSAR permite a detecção de deslocamento unidimensional na direção da linha de visada do radar (*Line of Sight*, LOS), ou seja, ao ocorrer qualquer deslocamento na barragem, no intervalo da aquisição das imagens, o mesmo pode ser observado por meio da diferença entre as fases, como pode-se observar na Figura 2-9, a menos que o dado não seja recuperado devido a alguma limitação.

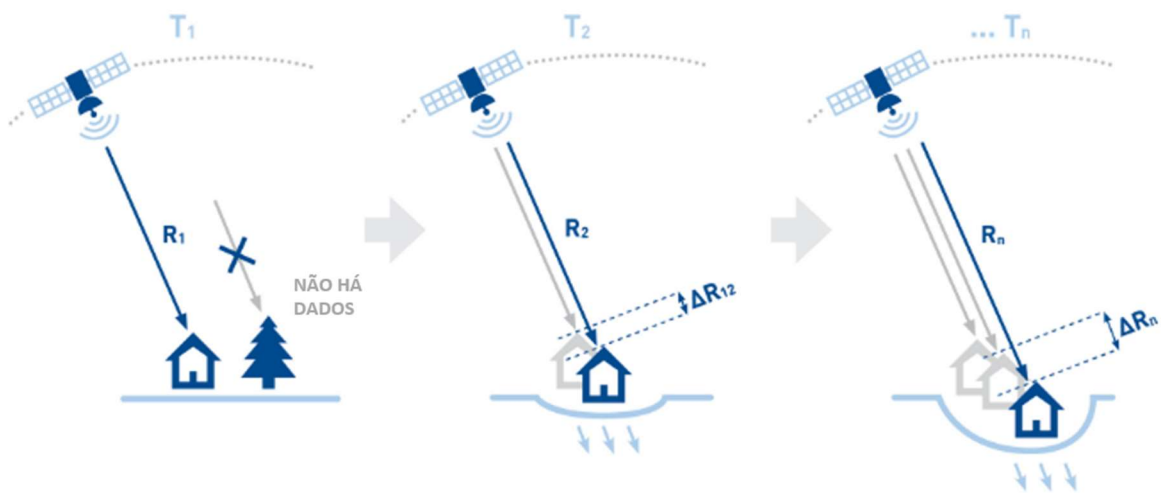


Figura 2-9 – Linha de visada do satélite e detecção de movimentação temporal (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).

As medições de fase do InSAR são expressas como ângulos e limitada entre 0° e 360° . Quando as áreas se deslocam em mais de 360° sem um gradiente de deslocamento circundante e crescente, ambiguidades de fase podem ocorrer e o deslocamento não pode ser medido de forma confiável. Os deslocamentos mensuráveis estão limitados por medições consecutivas que não excedam meio comprimento de onda, o que levaria a ambiguidade nas medições de fase. Para TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed, sensores de banda X, meio comprimento de onda é equivalente a um deslocamento entre 0 cm e 1,5 cm no intervalo de duas aquisições de imagens,

em torno de 11 dias (Sharon & Eberhardt, 2020). A Figura 2-10 apresenta a relação entre o deslocamento do solo, obtido por meio da mudança de fase do sinal em diferentes momentos.

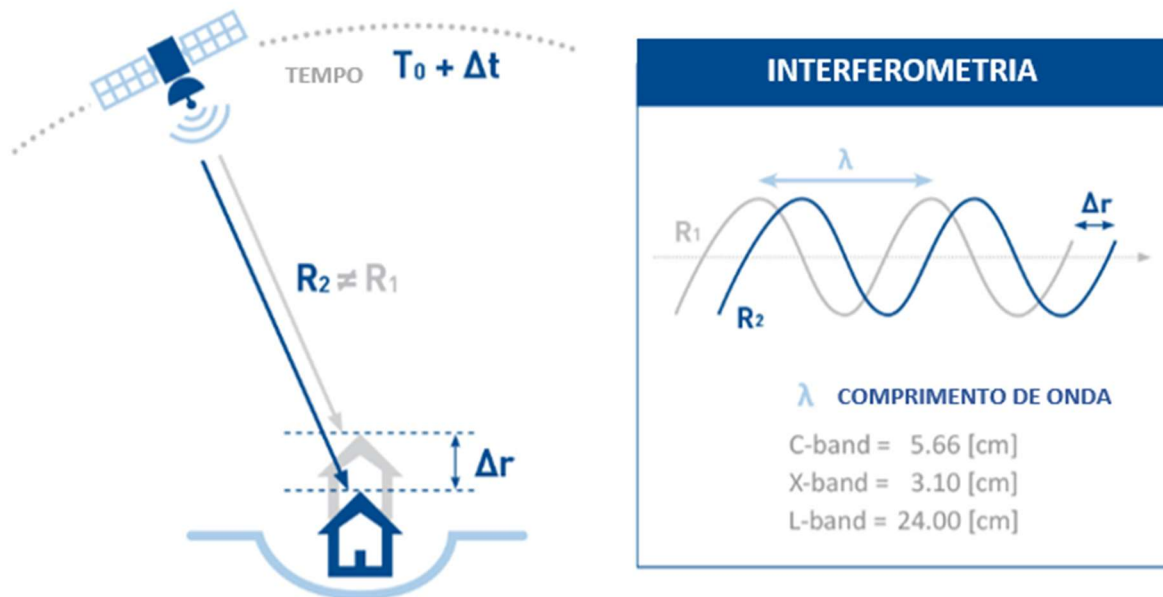


Figura 2-10 – Relação entre o deslocamento do solo e a mudança de fase do sinal (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).

Algumas técnicas podem ser utilizadas durante o processamento dos dados do InSAR. A técnica *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) consiste na análise de espalhadores persistentes, alvos que refletem energia durante todo o período da análise e são visíveis no conjunto das imagens SAR, mesmo que haja variações nas órbitas do satélite. Espalhadores persistentes típicos são estruturas geométricas funcionando como refletores, como construções e estruturas naturais, afloramento de rochas e encostas. Com resultados quantitativos precisos e confiáveis, essa técnica permite uma cobertura de grandes áreas, garantido a detecção de deformações regionais e em feições individuais, como estruturas e construções, com precisão milimétrica na linha de visada do SAR (+1 mm de taxa de deslocamento média e 5 mm para medida individual), considerando dados em banda X (Paradella *et al.*, 2021; TRE-ALTAMIRA, 2023a).

A abordagem *SqueeSARTM* utiliza, junto a técnica PSI, pixels de áreas extensas caracterizados por retroespalhamento menos intenso que os dos PS, mas estatisticamente homogêneos chamados de espalhadores distribuídos (*Distributed Scatterer*, DS). DS correspondem a áreas sem grande cobertura vegetal, onde a densidade de PS tende a ser baixa ou ausente, ocasionando um ganho de informação com o incremento pelo aumento na cobertura de pontos de áreas mais diversificadas, com a inclusão de alvo relacionados com áreas homogêneas e de baixa

refletividade, e com acurácia de análise similar ao PS (Paradella *et al.*, 2021). A Figura 2-11 exemplifica a utilização de PS e DS, e regiões sem recuperação de dados (*no data*).

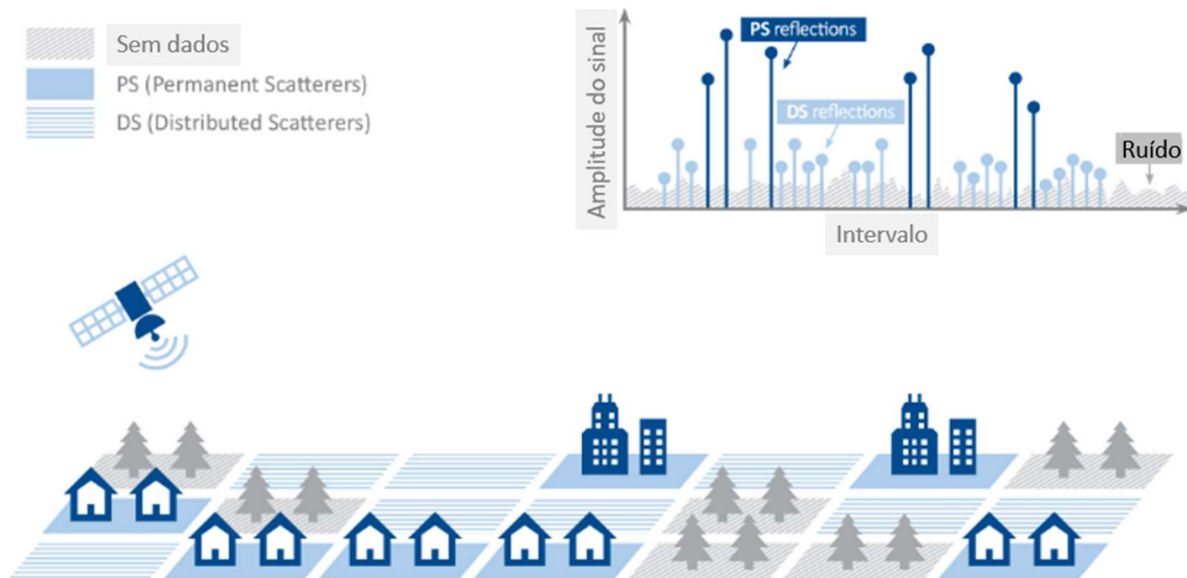


Figura 2-11 – Abordagem *SqueeSAR™* (PS e DS) (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).

O InSAR permite que possíveis deslocamentos lentos do terreno possam ser medidos com precisão de milímetros por ano e de forma regional, sem a instalação de qualquer equipamento de campo, monitorando grandes áreas em curto período e a baixo custo, quando comparado com os monitoramentos convencionais (Paradella *et al.*, 2021; TRE-ALTAMIRA, 2023a).

Porém, como qualquer outra tecnologia, essa técnica também possui limitações, como possíveis distorções geométricas ocorridas, principalmente, em regiões de relevo irregular ou com alta declividade e devido à visada lateral do satélite, sendo os principais tipos o encurtamento de rampa (*foreshortening*), a inversão de relevo ou sobreposição (*layover*) e o sombreamento (*shadowing*). Os satélites SAR operam como sensores de observação lateral, conforme Figura 2-12, isso porque as micro-ondas emitidas pelos sensores são refletidas da superfície da Terra e são recebidas por ordem de chegada, nesse sentido, um satélite apontando diretamente para baixo receberia muitas micro-ondas em um curto espaço de tempo, resultando em pouca separação entre essas ondas no espaço da imagem. Em terreno plano, um sensor lateral recebe as micro-ondas refletidas com uma determinada ordem e as distâncias no alcance do solo medidas serão dimensionadas corretamente no espaço da imagem (Sharon & Eberhardt, 2020).

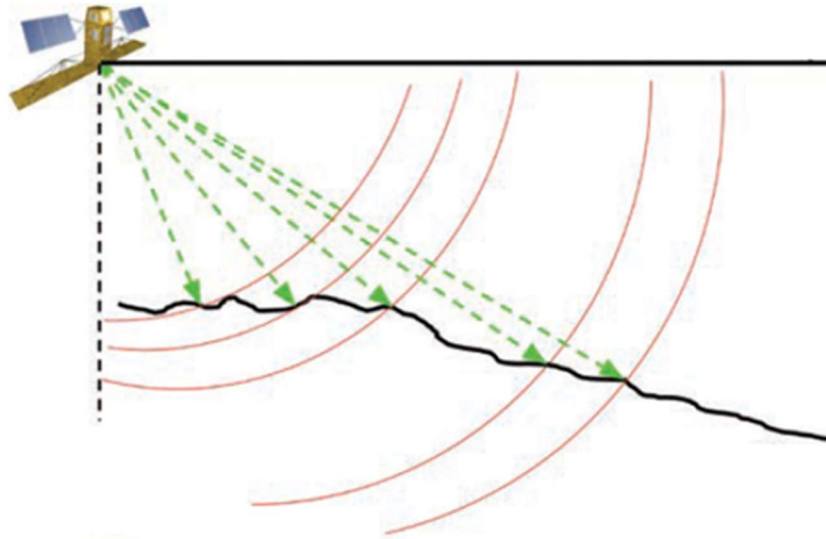


Figura 2-12 – Exemplo de sensor de observação lateral e micro-ondas emitidas pelo sensor (Sharon & Eberhardt, 2020).

Para áreas com topografia mais variável, como uma mina a céu aberto, a situação é mais complexa, uma vez que uma inclinação alta retornará sinais primeiro do topo do talude e depois da base, assim, a inclinação será representada de forma invertida na imagem, esse efeito corresponde a sobreposição (*layover*). Outras áreas podem ser sombreadas, nesses casos, normalmente, pelo menos uma geometria obtém dados recuperados. As áreas de sobreposição e sombra variam em função do ângulo entre o nadir do satélite e seu ângulo de visada, esse ângulo geralmente não é fixo, por exemplo, para TerraSAR-X varia entre 20° e 50° (Sharon & Eberhardt, 2020).

A Figura 2-13 exemplifica as distorções de encurtamento de rampa (*foreshortening*, F), inversão de relevo ou sobreposição (*layover*, L) e o sombreamento (*shadowing*, S), que ocorrem de acordo com a relação entre o ângulo de incidência local do satélite e a declividade média do terreno e podem acarretar a não recuperação de dados, como pode ser observado nas regiões da imagem indicada pela letra S, indicando regiões sombreadas (Lewis *et al.*, 1998).

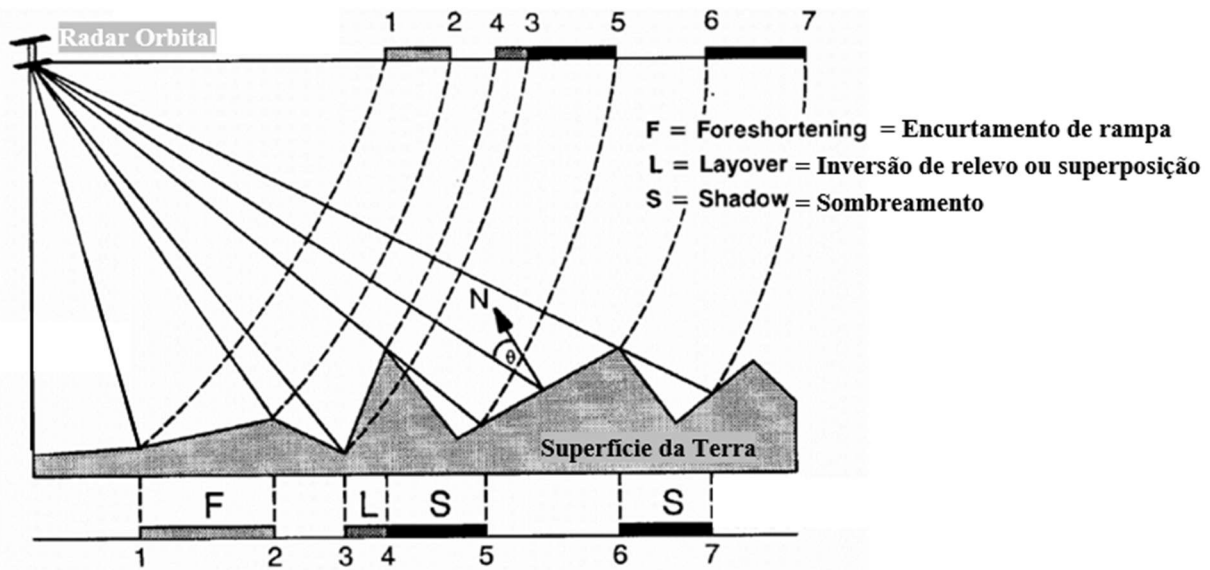


Figura 2-13 – Encurtamento de rampa (*foreshortening*, F), inversão de relevo ou superposição (*layover*, L) e sombreamento (*shadowing*, S) (modificado de Alaska Satellite Facility, 2023).

Uma premissa básica no estudo de qualidade dos dados é a análise do banco de dados no que diz respeito a ruídos, avaliados pelo nível de coerência, especificidades do processamento de dados, tempo de revisita, entre outros fatores que influenciam diretamente na confiabilidade da informação. A coerência do sinal é um parâmetro associado à qualidade do sinal coletado sendo utilizado como critério mínimo de aceitação de um dado. Como as atividades de mineração estão associadas a superfícies expostas e com pouca cobertura vegetal, espalhadores com coerência interferométrica são passíveis de detecção, permitindo assim extrair medidas de deformação do terreno mesmo em épocas de maior precipitação (Paradella *et al.*, 2021).

A coerência interferométrica é usada em todo o processamento InSAR para avaliar a qualidade e confiabilidade da medição, consiste em uma medida do grau de correlação de cada pixel entre a imagem atual e a anterior, com valores próximos a 1,0 indicando pouca diferença entre as duas imagens. Regiões com fases imutáveis ou que variam suavemente recebem alta coerência. As causas comuns de baixa coerência podem ser: perturbação da superfície, como escavação e depósito de material entre as revisitas do satélite; vegetação, dado que movimentação de folhas e árvores não refletem os dados do radar de forma consistente; áreas alagadas ou solos encharcados, a umidade pode fazer com que ocorra espalhamento do sinal de forma imprevisível de imagem para imagem; neve ou gelo e; movimentos com altas taxas de deformação. Tudo isso pode interferir na qualidade dos dados do InSAR e ocasionar falta de dados devido à baixa confiabilidade (Sharon & Eberhardt, 2020).

O InSAR também possui outras limitações e características técnicas que precisam ser bem conhecidas para um monitoramento eficaz e que podem influenciar na coerência do dado. Direções de deslocamento desfavoráveis ao monitoramento podem não ser corretamente interpretados, uma vez que o InSAR apresenta uma medição em uma dimensão (1D) ao longo da linha de visada do sensor, se a direção vetorial total do deslocamento coincidir com essa visada, 100% do deslocamento poderia ser recuperado, no entanto, isso não ocorre e os vetores normalmente são diferentes, com isso, o InSAR pode subestimar a verdadeira magnitude do deslocamento (Sharon & Eberhardt, 2020; Paradella *et al.*, 2021).

Além da resolução temporal referente a um tempo fixo de revisita, o requisito de resolução espacial é também fundamental. Estruturas com bancadas, bermas e taludes necessitam de resolução espacial elevada para amostragem de pontos no terreno. Os sistemas comerciais muito utilizados na mineração, TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed, possuem resolução 3 m x 3 m (9 m²) para as órbitas de passagem ascendente e descendente, acarretando 10 vezes mais pontos medidos em comparação com a resolução de, aproximadamente, 5 m x 20 m (100 m²) para os dados das órbitas dos SARs da missão Sentinel, disponível gratuitamente (Paradella *et al.*, 2021).

Coberturas desfavoráveis em algumas estruturas podem ocorrer devido à baixa resolução espacial e as limitações em função das relações geométricas entre a estrutura e as órbitas ascendente e descendente do satélite, fazendo com que a densidade de pontos em ambas as órbitas não seja semelhante. Para que deslocamentos horizontais leste-oeste (EW) e verticais possam ser calculados e essa limitação espacial possa ser superada, os conjuntos de dados dos pontos alvo do radar são reamostrados por meio de uma grade regular, caracterizada por um intervalo de espaçamento pré-definido de 10 m x 10 m (Paradella *et al.*, 2021).

Sendo assim, os produtos entregues além de contar com os dados de deslocamento segundo a órbita descendente e ascendente, por meio de decomposição vetorial dos pontos homólogos, ou seja, pontos com posição relativa semelhante em diferentes momentos, pode-se obter componentes de deslocamento na vertical e EW, conforme Figura 2-14.

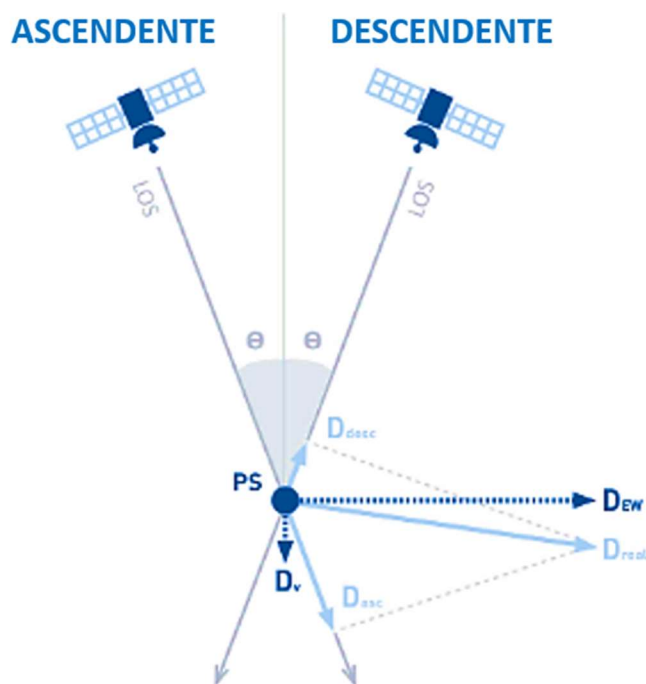


Figura 2-14 – Órbitas ascendente e descendente e decomposição de pontos homólogos: direção EW e vertical de movimentação (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023a).

Pode-se observar que no caso de um deslocamento real (D_{real}) apresentado na Figura 2-14, a magnitude e direção observada para as órbitas ascendente e descendente são descritas como D_{ASC} e D_{DESC} . Percebe-se que a magnitude do deslocamento real é reduzida para ambas as órbitas, dado que o que seria observado é apenas a decomposição do movimento real na direção da linha de visada. Se a direção do vetor total de deslocamento coincidissem com uma das linhas de visada, 100% do deslocamento poderia ser observado, no entanto, geralmente não é o que ocorre.

Ressalta-se que o InSAR não fornece medidas claras de deformação horizontal na direção norte-sul porque o satélite orbita a Terra em uma órbita subpolar com um ângulo de visada de abertura sintética EW. Além disso, qualquer movimento perpendicular à linha de visada ascendente e descendente do satélite não é possível de ser detectado e mensurado. Sendo assim, para o caso de uma barragem que possui a crista orientada na direção EW qualquer deformação montante-jusante é difícil de discernir apenas com esta tecnologia. Resultados melhores são obtidos para barragens quando a direção de visada é orientada de modo mais perpendicular à crista das estruturas (Sharon & Eberhardt, 2020; Paradella *et al.*, 2021; TRE-ALTAMIRA, 2023a).

Por fim, uma vez que um bom monitoramento com InSAR não é possível quando uma área de interesse está coberta por neve ou excesso de vegetação, algumas soluções estão sendo criadas

nos últimos anos para superar essa limitação. Uma solução eficaz é a instalação de uma rede de refletores de canto (*Corner Reflectors*, CR), que podem atuar como prismas, sendo capaz de obter medições de deslocamento em áreas com vegetação densa ou com presença de neve. Os *Corner Reflectors*, são instrumentos leves instalados em campo para refletir o sinal do satélite, sem necessidade de energia ou manutenção, capaz de monitorar áreas de interesse, resistente a corrosão e desenvolvido para evitar acúmulo de neve e gelo. No entanto, mesmo com bons resultados, apenas pontos únicos estão sendo observados, e a vantagem espacial do InSAR sobre as técnicas convencionais de levantamento, como a ETR, é temporariamente perdida durante o inverno (Sharon & Eberhardt, 2020; TRE-ALTAMIRA, 2023b).

A solução instalada em campo e seu funcionamento com a linha de visada do satélite podem ser observados na Figura 2-15 e Figura 2-16, respectivamente.



Figura 2-15 – Instalação do *Corner Reflector* em campo (TRE-ALTAMIRA, 2023b).

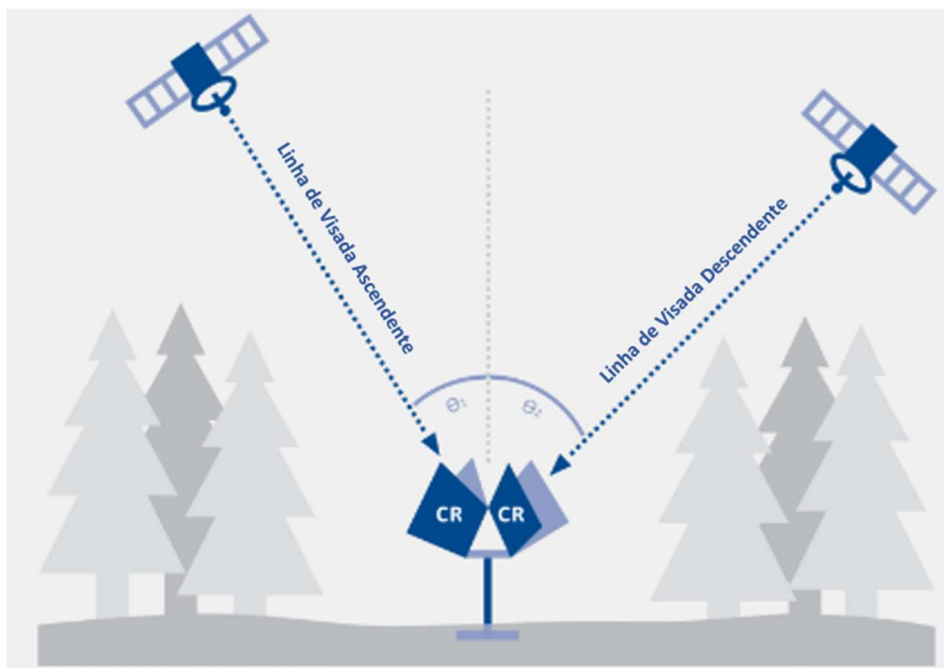


Figura 2-16 – Funcionamento do *Corner Reflectors* (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023b).

A análise de densidade sazonal de pontos de medição da técnica InSAR apresenta a vantagem da utilização inovadora desses instrumentos, conforme Figura 2-17. Durante o verão, período sem neve, há a detecção de uma boa densidade de pontos de medição usando refletores naturais no solo e os Corner Reflectors, enquanto durante o inverno, com presença de neve, as áreas críticas podem ser monitoradas usando apenas a rede de instrumentos, que pode ser adaptada de acordo com às necessidades do projeto (TRE-ALTAMIRA, 2023b).

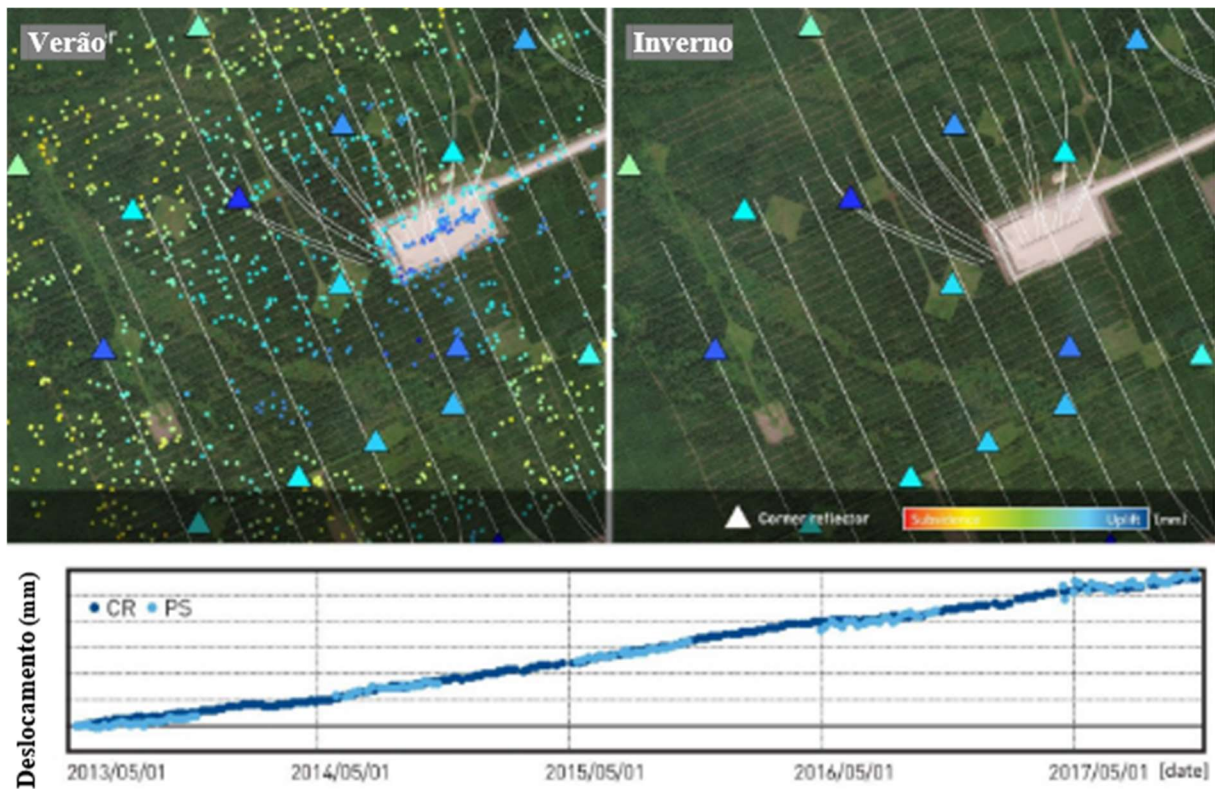


Figura 2-17 – Série temporal de deslocamento do terreno (PS) e *Corner Reflectors* (CR), marcado em triângulo no mapa, no verão e inverno (modificado de TRE-ALTAMIRA, 2023b).

De forma a resumir e ressaltar algumas das informações acerca do Radar Orbital InSAR apresentadas no presente Item, a Tabela 2-4 apresenta um resumo dos pontos importantes elencados.

Tabela 2-4 – Resumo dos pontos importantes apresentados acerca do Radar Orbital InSAR.

PONTOS IMPORTANTES – RADAR ORBITAL INSAR
Permite que possíveis deslocamentos lentos do terreno possam ser medidos com precisão de milímetros por ano e de forma regional, sem a instalação de qualquer equipamento de campo, monitorando grandes áreas em curto período e a baixo custo.
Monitoramento estratégico, de longo prazo, ideal para a identificação prévia de possível região com deslocamento anômalo, permitindo desencadear planos de ação relacionados a instalação de equipamento de monitoramento crítico, manutenções corretivas ou possíveis obras.
A escolha da banda utilizada exerce um papel importante nos resultados, quanto maior o comprimento de onda, mais efetivo é a capacidade de penetração em um material dielétrico e menor a sensibilidade a pequenos deslocamentos.
Uma vez que apresenta medições em uma dimensão, na linha de visada, o InSAR pode subestimar a verdadeira magnitude do deslocamento. Por isso, é importante analisar mudanças de tendências de deslocamento e não apenas ao valor da magnitude desse deslocamento.
Deslocamentos mensuráveis estão limitados por medições consecutivas que não excedam meio comprimento de onda, o que levaria a ambiguidade nas medições de fase, não recuperando dados; Sensores de banda X (TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed): meio comprimento de onda é equivalente a um deslocamento entre 0 e 1,5 cm no intervalo de duas aquisições de imagens, em torno de 11 dias. Ou seja, considerando um deslocamento linear, a velocidade máxima mensurável corresponde a 1,5 cm / 11 dias = aprox. 4 cm/mês.
Importante conhecer a resolução espacial do dado. Um pixel equivale a 9 m ² em órbita ascendente e descendente e 100 m ² na decomposição vetorial vertical e EW. (TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed).
Há a possibilidade de ocorrência de distorções geométricas, principalmente, em regiões de relevo irregular ou com alta declividade e devido à visada lateral do satélite, acarretando pouca ou nenhuma recuperação de dados.
Impossibilidade de identificação de movimentações puramente norte-sul: O InSAR não fornece medidas claras de deformação horizontal na direção norte-sul, o satélite orbita a Terra em uma órbita subpolar com um ângulo de visada de abertura sintética EW.
A coerência do sinal é um parâmetro associado à qualidade do sinal coletado, regiões com fases imutáveis ou que variam suavemente recebem alta coerência. Possíveis causas de baixa coerência e consequente não recuperação de pontos: perturbação da superfície, existência de vegetação, áreas alagadas ou solos encharcados, neve ou gelo e; movimentos com altas taxas de deformação.

2.4 MONITORAMENTO INSAR EM CASO DE RUPTURA

A técnica InSAR pode ser utilizada para detecção de deslocamentos superficiais e mudanças de tendências. Nesse sentido, por meio de retroanálise de casos históricos de ruptura de barragens e taludes, pode-se analisar se os dados indicaram ou indicariam possíveis deformações anômalas, caso fossem obtidos em período anterior a falha, o que possibilitaria a realização de medidas corretivas a tempo ou a instalação de tecnologias de monitoramento crítico (curto prazo) na região, visando a segurança.

Em março de 2018, ocorreu uma ruptura do aterro de uma barragem de rejeitos na mina de ouro de Cadia (Nova Gales do Sul, Austrália), como mostra a Figura 2-18. A lagoa de rejeitos a jusante manteve sua estrutura íntegra, evitando assim a dispersão de resíduos no meio ambiente. Foi relatado que o aterro era mais alto e mais íngreme onde a ruptura se desenvolveu, região em que também ocorreu uma escavação no pé. Portanto, é provável que a estrutura tenha cedido onde o desequilíbrio entre as forças de resistência e o carregamento imposto pela liquefação dos rejeitos foi localmente mais pronunciado (Carlà *et al.*, 2019).

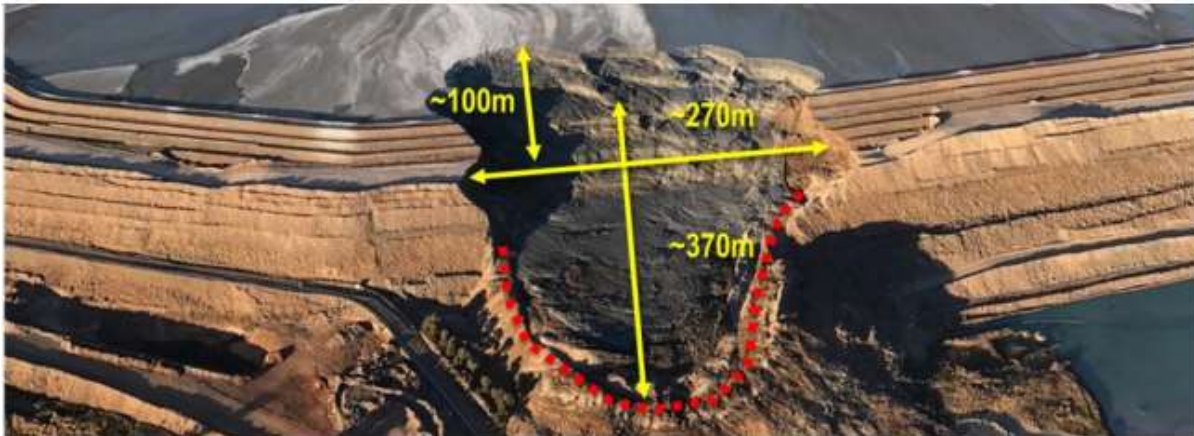


Figura 2-18 – Foto aérea da falha e dimensões estimadas (Thomas *et al.*, 2019).

Uma vez que evidências de condições precárias de estabilidade em campo, trincas de tração ou pequenas rupturas podem passar despercebidas, é essencial a detecção prévia de qualquer deformação em uma barragem. Por meio da retroanálise da última aquisição de dados de InSAR antes do evento, observou-se que os deslocamentos na linha de visada do satélite eram muito sutis ou dentro da margem de erro da técnica na maior parte do período monitorado, com forte aumento a partir de janeiro de 2018. Pontos no restante da estrutura apresentaram movimentos menores ou permaneceram essencialmente estáveis durante todo o período (Carlà *et al.*, 2019).

Sendo assim, o conjunto de dados apresentou tendências aceleradas de deslocamento nas semanas que antecederam a falha de talude investigada (março/2018). A Figura 2-19 apresenta a série temporal de um ponto, com visível aceleração a partir de janeiro de 2018, localizada na área da ruptura, delimitada pelo polígono vermelho (Carlà *et al.*, 2019).

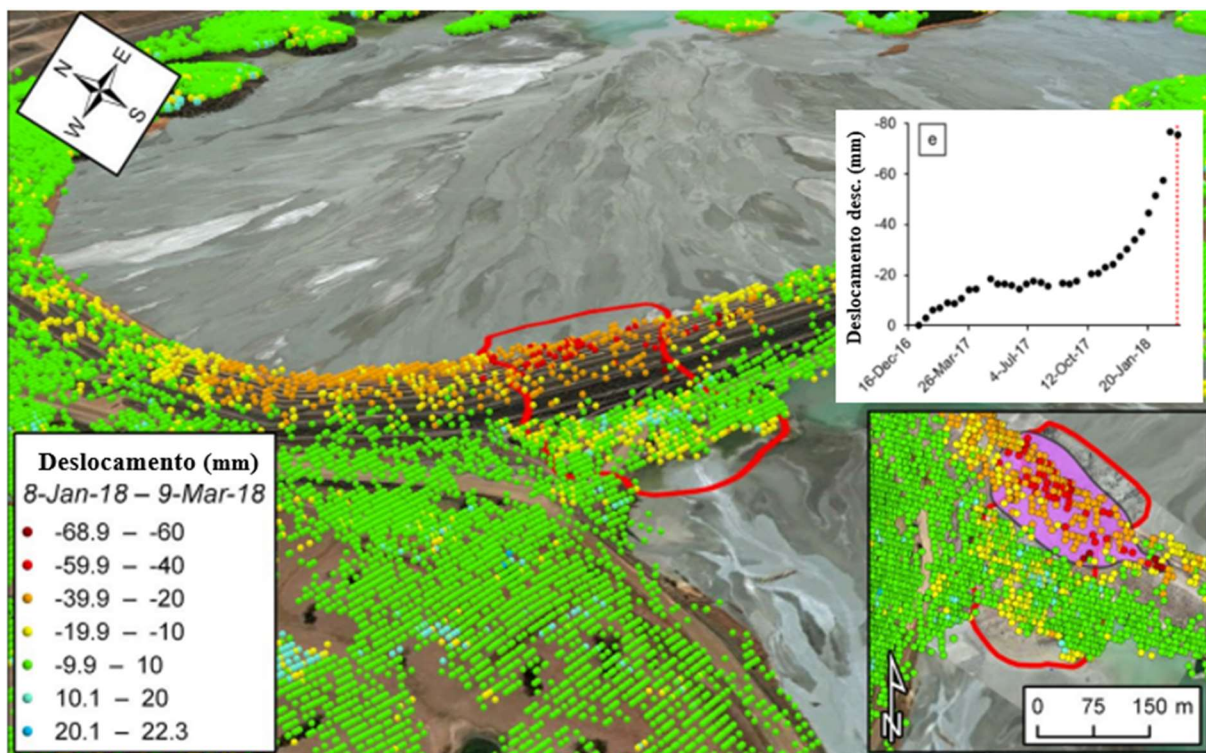


Figura 2-19 – Dados do InSAR, obtidos da órbita descendente do Sentinel 1, mostrando deformação precursora à falha na barragem da mina de ouro de Cadia (modificado de Carlà *et al.*, 2019).

Importante pontuar que detectar um deslocamento anômalo em uma retroanálise é mais fácil que no monitoramento diário. Outras regiões desse maciço também mostraram deslocamentos, em menor intensidade, e não romperam, sendo essencial o conhecimento do comportamento geotécnico da estrutura e o histórico total de monitoramento. É importante também conhecer as limitações e possibilidades de utilizações da tecnologia, podendo utilizar os dados do InSAR não para um monitoramento crítico, mas para indicar locais, com antecedência, em que se poderia instalar monitoramentos em tempo real ou quase real.

Outra retroanálise foi realizada para o deslizamento de terra, em terreno natural, de Maoxian que ocorreu em 24 de junho de 2017 e matou mais de 100 pessoas na vila de Ximno, na China. Os dados obtidos pela técnica InSAR mostram a área de origem do deslizamento, com uma taxa de deslocamento máxima detectada de 27 mm/ano ao longo da linha de visada do satélite na órbita descendente. As séries temporais de deformação de pontos selecionados na área em que se iniciou o deslizamento de terra apresentadas na Figura 2-20 exibem a evolução da deformação ao longo de todo o período de monitoramento (Intrieri *et al.*, 2018).

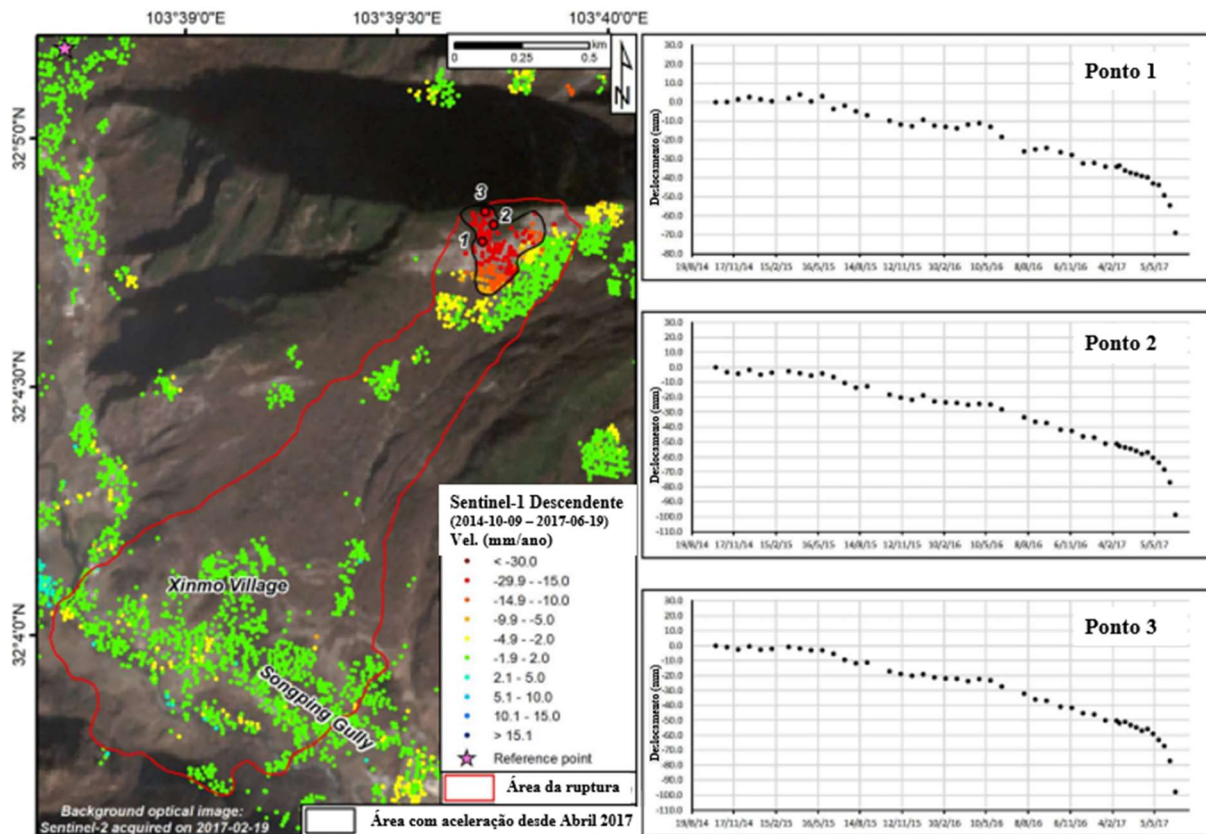


Figura 2-20 – Mapa de deslocamento da região do deslizamento de terra Maoxian e séries temporais de deslocamento de pontos selecionados na região de maiores velocidades. Dados do Sentinel 1, órbita descendente. (modificado de Intrieri *et al.*, 2018).

Essas séries de dados temporais são de suma importância para avaliar a cinemática de um determinado fenômeno, destacando as mudanças potenciais ocorridas durante o período de monitoramento, como as acelerações observadas em meados de 2015 e 2016, e a aceleração repentina antes da falha de deslizamento de terra, a partir de abril de 2017 (Intrieri *et al.*, 2018).

A Figura 2-21 apresenta para a região do início da ruptura um mapa e linhas de tendências de deslocamentos de áreas com diferentes comportamentos cinemáticos. Os pontos em verde no mapa, indicam dados com comportamentos estáveis, como pode ser observado na linha de tendência de um ponto selecionado. As cores amarela e marrom no mapa e no gráfico indicam regiões de deslocamentos lineares e acelerado, respectivamente. A cor vermelha indica no mapa a região de ruptura e, no gráfico, a data de ruptura.

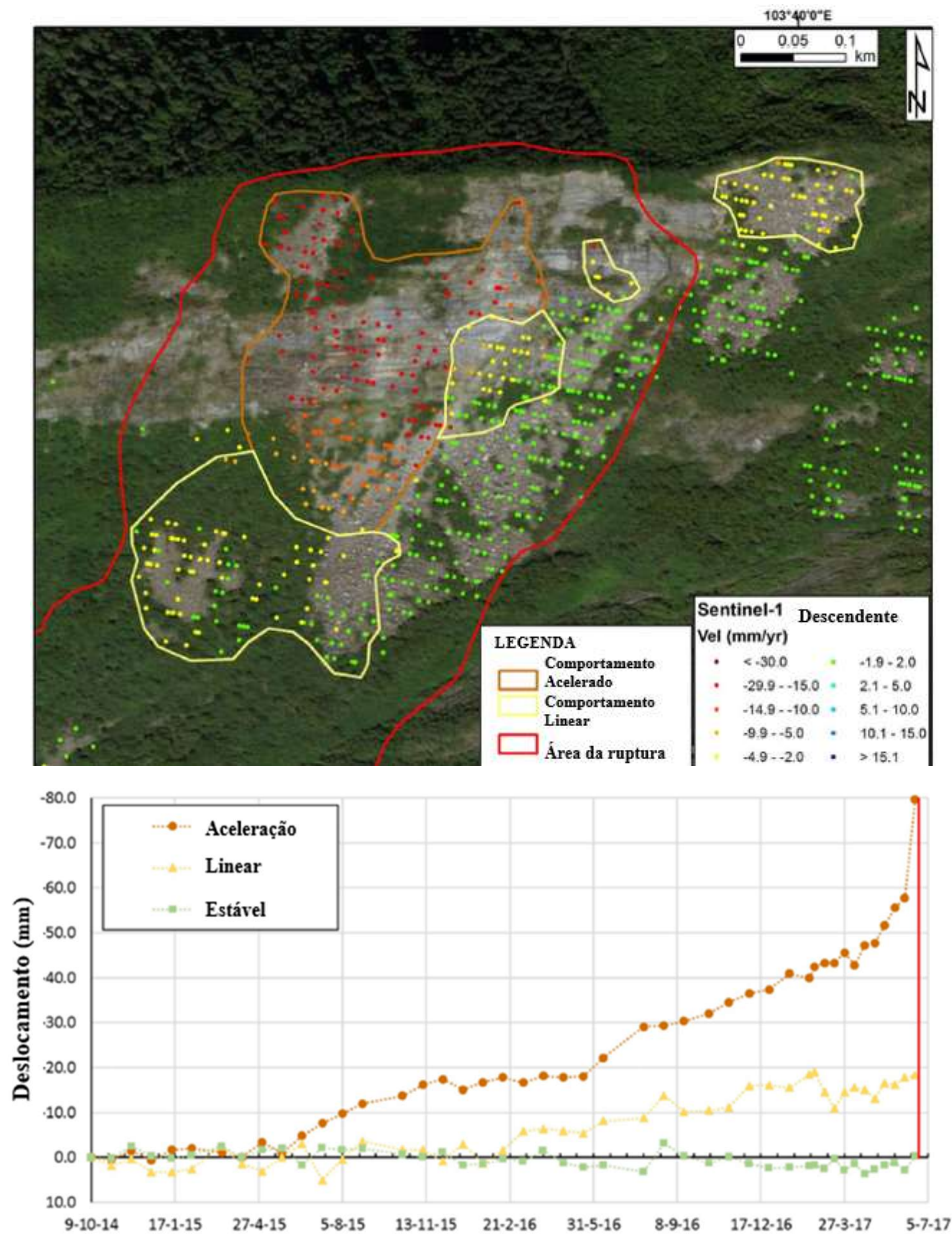


Figura 2-21 – Mapa e linhas de tendências dos dados (órbita descendente, Sentinel 1) das áreas com diferentes comportamentos cinemáticos (modificado de Intriери *et al.*, 2018).

Observa-se, então, que os dados do InSAR indicaram progressão de movimento em um período de 2 meses prévio a falha, porém as limitações de tempo de obtenção e processamento de dado, um dos motivos que classifica a técnica como monitoramento estratégico, poderia não ser ideal para detecção da falha em tempo hábil, mas sim, ideal para a identificação prévia de possível região anômala. Isso reforça a capacidade da técnica para a função de detecção e identificação de locais anômalos, visando instalação de monitoramento crítico.

2.5 ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA

Um importante instrumento de monitoramento de deslocamento superficial já consagrado no monitoramento geotécnico é a Estação Total Robótica (ETR). Com métodos bem estabelecidos, tem como principal objetivo o monitoramento a médio e longo prazo. É um equipamento de alta precisão capaz de medir ângulos horizontais e verticais e medições de distância (*Line of Sight*, LOS) a partir de uma base georreferenciada, permitindo calcular para cada ponto de medição, a posição 3D e transformar para um sistema de coordenadas locais x, y e z ou leste, norte e elevação.

Uma estação total pode ser operada manualmente, com o operador movendo fisicamente o instrumento para o local para medir as localizações de alvos definidos no campo, chamados prismas, ou automaticamente a partir de um local fixo usando um *software* para controlar o equipamento e realizar levantamentos frequentes de uma rede de prismas. Nesse último caso, o intervalo entre cada aquisição é da ordem de minutos, de acordo com a malha de prismas instalados. Posteriormente, esses dados são carregados em um sistema de processamento de dados em que é possível verificar se a estrutura está apresentando movimentação superficial e mensurar sua magnitude (Sharon & Eberhardt, 2020; Leica Geosystem, 2023).

As estações totais têm alcances de 1.500-3.000 m e a precisão de suas medições depende da refletividade e da distância ao alvo. Para a maioria das estações totais robóticas modernas, essa precisão é de 0,6 mm + 1,5 ppm (Sharon & Eberhardt, 2020; Leica Geosystem, 2023). A Figura 3-20 apresenta um modelo de estação total para fins de monitoramento.



Figura 2-22 – Estação Total Robótica modelo TM50 (Leica Geosystem, 2023) e instalação em edificação de proteção posicionada em terreno estável (Hawley *et al.*, 2009).

A tecnologia realiza a leitura dos prismas por meio da emissão de ondas ópticas tipo laser (feixe de luz), podendo sofrer alterações em condições de variações atmosféricas, como temperatura,

pressão e umidade. Outras limitações da ETR, que podem gerar ruídos ou perda nas leituras durante o monitoramento, são erros devido à precisão do aparelho, precisão de refletância dos prismas de monitoramento e referenciais e instabilidade dos prismas de monitoramento, de referência ou do próprio marco de instalação da ETR. Outro elemento importante a ser considerado é que as três entradas utilizadas para a detecção de movimento, ângulo horizontal e vertical e distância inclinada, possuem diferentes níveis de precisão, que variam com a distância. Além disso, os erros e saltos por calibração, manutenção e erros sistemáticos podem ser facilmente diferenciados e devem ser removidos das medições (Sharon & Eberhardt, 2020).

Uma configuração típica de um bom monitoramento por ETR compreende três componentes. Um deles é uma rede de prismas de referência instalados em terreno estável, uma vez que são utilizados para correções angulares, implicando em ajustes nos valores de deslocamentos horizontais mensurados pela ETR. Sendo assim, qualquer movimentação ocorrida nesses referenciais pode ser repassada aos prismas de monitoramento como possível movimentação da estrutura. Outro fator importante é a ETR estar instalada em terreno natural e estável, que permita ampla visualização para a região a ser monitorada e garanta que os deslocamentos medidos são decorrentes dos prismas e não do equipamento. A instabilidade dos dados da ETR pode estar correlacionada com uma movimentação do próprio marco de instalação da ETR, do terreno natural em que esse está instalado ou de problemas de instalação e fixação da ETR com o marco. Por fim, faz-se necessário uma rede de prismas instalados sobre a estrutura a ser monitorada, considerando uma maior concentração em áreas de maior interesse e risco. É preferível que a direção da medição esteja na direção do movimento provável, de modo que as leituras de distância inclinada (*Slope Distance*) se aproximem do movimento real (Sharon & Eberhardt, 2020). Dependendo do ambiente, também é indicado que a ETR esteja alojada em uma infraestrutura de proteção sobre terreno estável, ilustrado na Figura 2-22.

Além disso, é importante que as pessoas envolvidas no monitoramento e recebimento dos dados tenham conhecimento da definição do modo de operação da ETR. Os prismas de referência são utilizados para correções angulares, influenciando nos valores de deslocamentos horizontais medidos pela ETR. Um dos modos de operação utilizado é o “*Orientation Only*”, esse modo considera fixo as coordenadas da ETR e dos referenciais, calculando a orientação com base no ângulo medido a partir do Norte, entre 0° e 360° no sentido horário. Uma vez que os referenciais e a base da ETR são considerados fixos, qualquer deslocamento desses sistemas, marcos ou prismas de referência, serão repassadas aos prismas de monitoramento como possível movimentação da estrutura, sendo fundamental realizar análises conjuntas com prismas de

monitoramento e referenciais, para um correto discernimento entre movimentação real e movimentação do sistema de monitoramento (Leica Geosystem, 2010; Clemente *et al.*, 2022).

Outro método utilizado é o “*Free Station*” com correção de coordenada, nesse método as coordenadas horizontais da ETR não são consideradas fixas e podem ser ajustadas de acordo com as medições dos prismas de referência, considerados fixos. Porém, assim como no método anterior, movimentações nos prismas de referência implicam na distribuição de ruídos para todos os prismas de monitoramento. A vantagem da utilização do “*Free Station*” é a possibilidade de identificar movimentação do marco da ETR ou do terreno em que esse se encontra (Leica Geosystem, 2010; Clemente *et al.*, 2022).

O método “*Orientation Only*” é normalmente utilizado quando há apenas um referencial, que pode ocorrer em regiões de difícil acesso ou visada. O método “*Free Station*” sem correção de coordenada é utilizado para o caso de mais de um referencial, e permite a obtenção de dados de possíveis deslocamentos do marco da ETR. O método “*Free Station*” com correção de coordenada, também utilizado para o caso de mais de um referencial, permite que o sistema corrija possíveis deslocamentos que o marco possa estar experimentando. De toda forma, independente da escolha do método, é extremamente necessário a existência de referenciais estáveis e confiáveis.

A correta utilização da distância de instalação e ângulos dos prismas de referência e posicionamento da ETR também é de extrema importância, uma vez que implica diretamente na correção do ângulo e na quantidade de ruído medida pelo sistema, quanto maior a distância da medição, maior o nível de ruído do dado, a amplitude de variação do dado. O equipamento não deve ficar próximo demais nem distantes demais dos prismas de monitoramento e o ângulo sugerido entre os prismas de referência é de, aproximadamente, 60° a 70° e equidistantes, conforme exemplo na Figura 2-23 (Clemente *et al.*, 2022; Magalhães *et al.*, 2023).

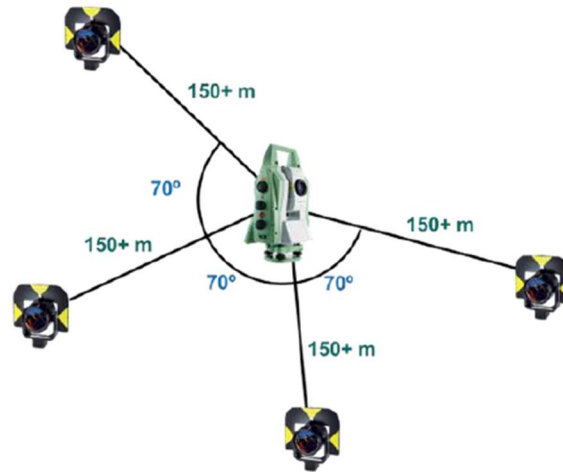


Figura 2-23 Sugestão de distribuição espacial de ângulos e distâncias entre uma ETR e prismas de referência (Magalhães *et al.*, 2023).

O IBGE define padrões ideais para a correta instalação do marco geodésico, como um pilar de concreto com dispositivo de centragem forçada incrustado no seu topo, apresentado na Figura 2-24, ideais para marcos da ETR e de referenciais (IBGE, 2008).



Figura 2-24 – Exemplo de correta instalação de marco geodésico. a) Ferragens das estacas e do pilar devidamente engastadas na ferragem da base. b) Exemplo do marco pronto (IBGE, 2008, adaptada pelo autor).

Além disso, é muito importante que ocorra a correta instalação das hastes e prismas de monitoramento na estrutura. A Figura 2-25 apresenta um cenário ideal de instalação (A) e um cenário não indicado (B) (Magalhães *et al.*, 2023).



Figura 2-25 – Exemplos de condição dos prismas de monitoramento. a) Boa prática de instalação. b) instalação não indicada (Magalhães *et al.*, 2023).

No primeiro cenário (Figura 2-25a), é possível observar a base de concreto no entorno da haste, que confere maior estabilidade ao prisma e confiabilidade aos dados de monitoramento. No segundo cenário (Figura 2-25b), observa-se uma condição não indicada, em que o vento, a chuva e ações externas de animais, pessoas ou equipamentos podem alterar a posição da haste e do prisma, podendo indicar falsas movimentações da estrutura monitorada (Magalhães *et al.*, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo consiste na avaliação da aplicabilidade e confiabilidade da técnica InSAR, conforme fluxograma apresentado na Figura 3-1.

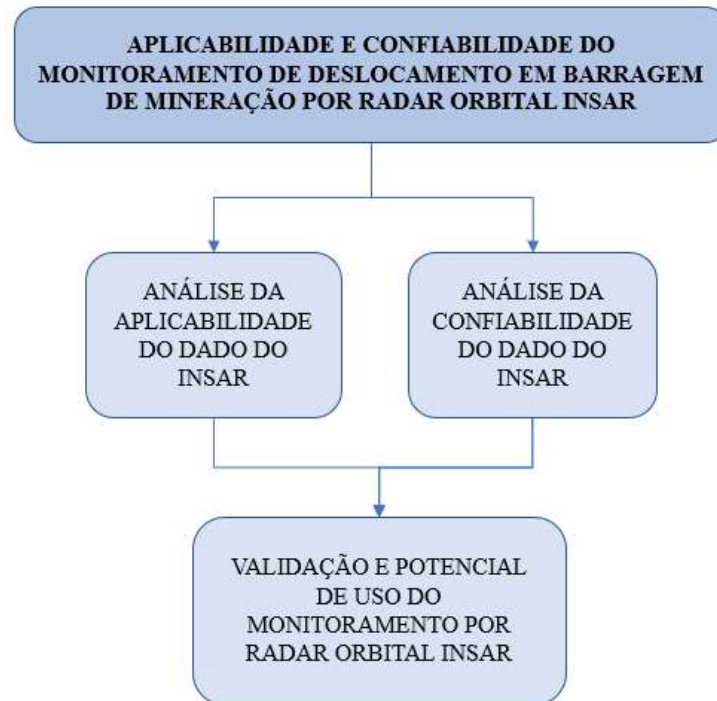


Figura 3-1 – Fluxograma do trabalho.

No que tange a aplicabilidade, com base nos itens estudados na revisão bibliográfica da presente pesquisa, foi relacionado o monitoramento via InSAR à possibilidade de detecção de possíveis causas dos principais modos de falha e possíveis anomalias de uma estrutura geotécnica, descritas em normas brasileiras e manuais de inspeções. O Item 3.1 descreve os materiais e métodos utilizados para essa análise.

No que tange a confiabilidade dos dados obtido por essa técnica, foram desenvolvidos dois estudos de caso acadêmicos utilizando duas barragens de mineração, com análises comparativas dos dados de monitoramento via InSAR e de outra tecnologia tradicional de deslocamento topográfico, a ETR, em conjunto com dados de pluviômetro. O Item 3.2 apresenta os materiais e métodos utilizados em cada etapa desse estudo.

Pretendeu-se validar a relevância dos dados do InSAR considerando sua aplicabilidade e confiabilidade, no sentido de analisar onde essa técnica deve e pode ser aplicada no monitoramento de anomalias de barragens de mineração e de recomendar ou não a utilização desses dados quanto a sua confiabilidade e similaridade com outra tecnologia de deslocamento.

Uma falta de confiabilidade ou aplicabilidade significativa desses dados poderia comprometer a relevância da utilização desse monitoramento, considerando-o não necessário.

Por fim, objetivou-se apresentar a abrangência da aplicação do dado no ambiente de mineração, considerando o potencial de uso do Radar Orbital InSAR. O Item 3.3 apresenta os materiais e métodos utilizados para essa etapa.

3.1 ANÁLISE DA APLICABILIDADE DOS DADOS DE INSAR

Considerando a revisão bibliográfica realizada acerca dos principais modos de falha, sendo esses galgamento, instabilidade, erosão interna e liquefação, em conjunto com a revisão acerca das limitações da técnica InSAR, como por exemplo, limitações temporais e espaciais, foi desenvolvida uma tabela com a correlação dos dados estudados, tendo como objetivo identificar a aplicabilidade desse monitoramento em possíveis causas de cada um dos principais modos de falha. Para isso, por meio de análise crítica e justificativa técnica, foi indicado se o uso da técnica InSAR pode ser classificado como um monitoramento desejável, complementar ou não aplicável, para cada possível causa dos principais modos de falha descritos na Tabela 2-2 do Item 2.2 da Revisão Bibliográfica.

Seguindo o mesmo método, considerando as possíveis anomalias de uma barragem de terra, descritos no Item 2.1, incluindo anomalias que podem interferir no Estado de Conservação dessas estruturas geotécnicas, foi analisada em uma segunda tabela, a aplicabilidade do monitoramento via InSAR na possibilidade de detecção de anomalias. Assim como descrito anteriormente, foi indicado se o uso da técnica InSAR pode ser considerado um monitoramento desejável, complementar ou não aplicável por meio de análise crítica e justificativa técnica. Como foco dessa pesquisa, foram considerados para análise as características dos dados das constelações TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed, de banda X, sistemas comerciais muito utilizados na mineração. A banda X é ideal para análise de estruturas que possuem deslocamento lento, com necessidade de maior detalhamento espacial.

A Figura 3-2 apresenta o Fluxograma da metodologia da análise da aplicabilidade da técnica InSAR em monitoramento de barragens de mineração.

ANÁLISE DA APLICABILIDADE DA TÉCNICA INSAR

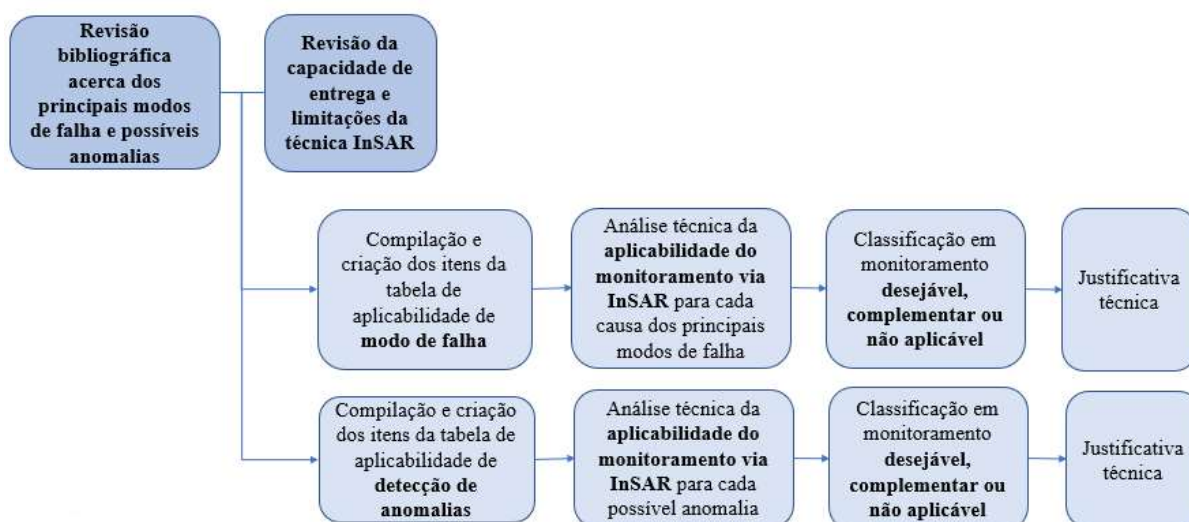


Figura 3-2 – Fluxograma de trabalho para as análises da aplicabilidade dos dados de InSAR.

Para ambos os estudos, foi levado em consideração as vantagens e desvantagens da utilização dessa técnica, por exemplo, é possível usar os dados de InSAR para detectar movimentos lentos e acelerações, porém, a técnica é limitada para a identificação de movimentos rápidos, não recuperando dados e não sendo aplicável para esse fim. Da mesma forma, distorções geométricas podem ocorrer, podendo não recuperar pontos de medição. Conhecendo todas as limitações descritas na revisão bibliográfica, foi possível justificar tecnicamente a aplicabilidade da técnica na detecção de comportamento anômalo ou na previsão desses comportamentos.

3.2 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DOS DADOS DE INSAR: ESTUDO DE CASO

O estudo de confiabilidade dos dados foi realizado por meio de dois estudos de caso acadêmicos utilizando duas barragens de mineração. Análises comparativas foram feitas considerando os dados de monitoramento obtidos pelo InSAR e por outra tecnologia tradicional de deslocamento topográfico, uma ETR. Além disso, dados de pluviometria obtidos por um pluviômetro localizado próximo à essas duas estruturas, foram utilizados para fins de complemento das análises.

Os projetos InSAR utilizados no monitoramento de estruturas de mineração são, principalmente, sensores que operam na banda X (comprimento de onda de $\lambda=3,1$ cm), devido ao nível de penetração na atmosfera e vegetação, à sensibilidade em termos de deslocamento e à resolução espacial do dado. Para o presente estudo, foram utilizados os dados da constelação

COSMO-SkyMed, caracterizada por cinco satélites em órbita compartilhada. Os dados de monitoramento são coletados a cada passagem do sensor com frequência de revisita aproximadamente fixa, da ordem de 11 dias, segundo Sharon & Eberhardt (2020). Contudo, é importante pontuar que a tecnologia demanda um processamento complexo e os produtos estudados na presente pesquisa são disponibilizados com intervalos de 1 a 2 meses. Dentre as técnicas do monitoramento interferométrico via SAR, utilizou-se a de *Persistent Scatterers* (PS), pontos coerentes em uma base histórica de vários levantamentos consecutivos.

O fluxograma desenvolvido no estudo é descrito na Figura 3-3, e os materiais e métodos são detalhados nos próximos subitens. Pontua-se que todas as análises do fluxograma foram feitas para um estudo de caso principal. A análise de comparação de dados foi realizada para dois estudos de caso, visando aumentar o entendimento da confiabilidade da técnica.

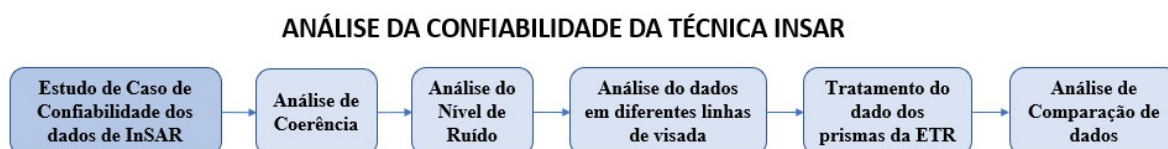


Figura 3-3 – Fluxograma de trabalho para as análises de confiabilidade dos dados de InSAR.

3.2.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA EM ESTUDO

A primeira estrutura utilizada para o estudo de caso de confiabilidade dos dados foi uma barragem de mineração com a finalidade de contenção de rejeito, com comprimento de crista de aproximadamente 884 m e altura de 35 m, com uma diversidade de instrumentos instalados. Essa estrutura, Barragem A, foi selecionada como estudo de caso principal pois apresenta maiores deslocamentos verticais e horizontais, o que enriquece a análise de diferentes linhas de visada e a comparação de dados com outra tecnologia de monitoramento de deslocamentos.

Foram utilizados para esse estudo, dezesseis prismas instalados no barramento e praia de rejeito monitorados por uma ETR em tempo quase real (24 horas por dia, 7 dias por semana, com ciclos de leitura de aproximadamente 10 min), os diversos dados obtidos pela técnica InSAR e o pluviômetro localizado próximo da estrutura, durante o período de 03/10/2021 a 19/02/2023.

A Figura 3-4 apresenta a localização da ETR, prisma de referência e os prismas de monitoramento instalados na Barragem A.

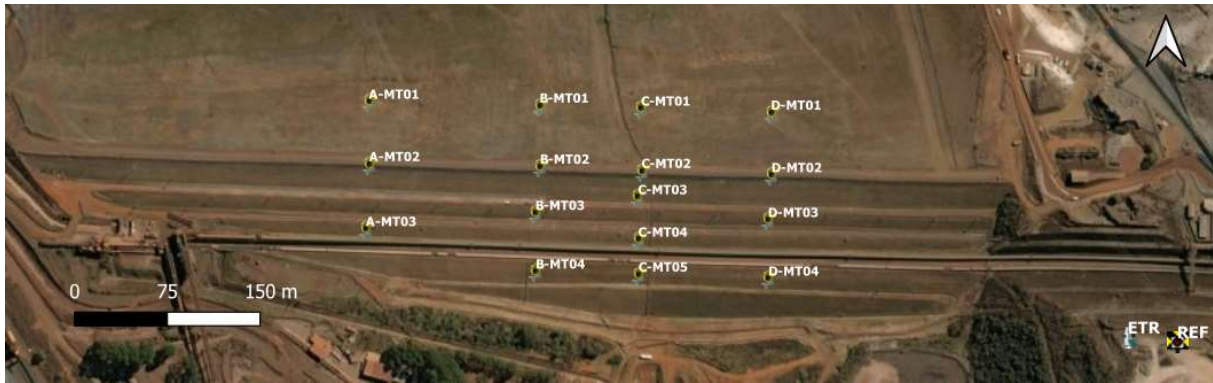


Figura 3-4 – ETR, referencial e prismas de monitoramento instalados na Barragem A.

Uma segunda estrutura foi selecionada apenas para o estudo de caso de comparação de dados, de forma a aumentar o entendimento e contribuir para a análise de confiabilidade dos dados da técnica. Uma vez que a estrutura do primeiro estudo de caso possui a crista orientada aproximadamente EW, dados do InSAR na decomposição EW indicam majoritariamente deslocamentos na direção ombreira ombreira. Dessa forma, uma segunda estrutura que apresenta a crista orientada aproximadamente norte-sul foi estudada, assim, dados do InSAR na decomposição EW indicam deslocamentos na direção montante-jusante (ou vice-versa) da barragem.

O segundo estudo de caso, Barragem B, é uma estrutura de contenção de sedimentos, com comprimento de crista de aproximadamente 88 m e altura de 11 m. Foram utilizados para o estudo, três prismas instalados no barramento monitorados por uma ETR com medições mensais, os diversos dados obtidos pela técnica InSAR e o pluviômetro localizado na mina, durante o período de 03/10/2021 a 19/02/2023. A Figura 3-4 apresenta a Barragem B e os prismas da estrutura.

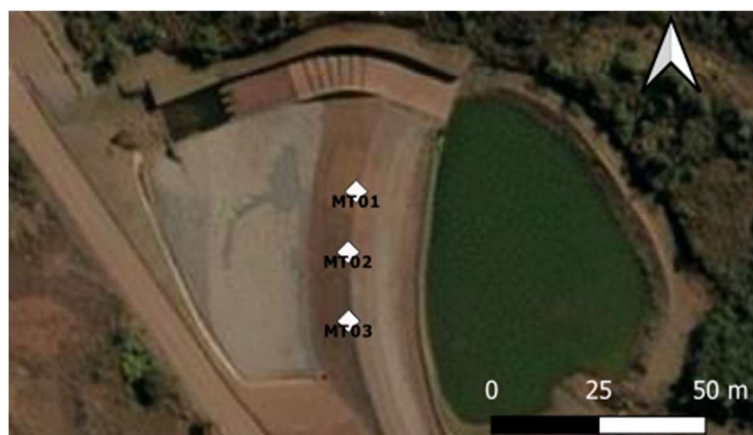


Figura 3-5 – Prismas de monitoramento instalados na Barragem B.

3.2.2 ANÁLISE DE COERÊNCIA E NÍVEL DE RUÍDO

A coerência do sinal é um parâmetro utilizado no processamento de dados como critério mínimo para aceitação desses dados. Ressalta-se que a coerência não foi calculada no presente trabalho, uma vez que faz parte da etapa de processamento do dado. Sendo assim, foram analisados, na Barragem A, os valores de coerência dos pontos já processados e entregues e o intervalo de dias de revisita do satélite, que podem influenciar na perda ou manutenção da coerência temporal dos dados.

Considerando a precisão da técnica, em torno de ± 5 mm/ano, os baixos valores de deslocamento apresentados pelo InSAR podem corresponder a ruídos do monitoramento ou do próprio sistema. Portanto, a análise da velocidade de deslocamento de pontos localizados em uma grande área selecionada próxima à Barragem A no terreno natural, considerado estável, foi realizada com a expectativa de obter uma maior concentração de deslocamentos de menor magnitude considerado o nível de ruído. A análise do histograma desses dados foi realizada e os intervalos de confiança de 99,7%, correspondentes ao uso de 3 vezes o desvio padrão a partir da média ($\mu \pm 3\sigma'$) da curva de distribuição normal, foram usados para a análise dos dados.

Além disso, foi realizada uma análise da possível influência da sazonalidade na faixa de variação normal dos dados, calculando o deslocamento ocorrido entre cada aquisição nessas áreas consideradas estáveis, com o objetivo de entender se a variação da amplitude dos dados aumenta em períodos secos ou chuvosos, o que deve ser levado em consideração em uma possível análise de comparação de dados de deslocamento acumulado de InSAR e prismas, por exemplo.

Importante mencionar que o foco do estudo não foi realizar o processamento dos dados em si, mas ter conhecimento e entendimento dos dados recebidos, já processados. Assim como para qualquer outro instrumento, é importante que os atores envolvidos no monitoramento, como geotécnicos, técnicos ou analistas, tenham conhecimento das variáveis envolvidas nos dados, por exemplo, da periodicidade de aquisição e da qualidade dos dados com que se está trabalhando, para um maior entendimento caso venha a ocorrer alguma perda de informação ao longo do tempo.

3.2.3 DADOS RECUPERADOS EM DIFERENTES LINHAS DE VISADA

As análises dos dados das diferentes linhas de visada do satélite, ascendente e descendente, e as decomposições EW e vertical, levando em consideração a coerência e o nível de ruído, foram

realizadas para a Barragem A. Para o caso de regiões sem recuperação de pontos, foram analisados possíveis motivos, de acordo com as limitações da técnica, como vegetação densa, existência de obras, presença de água ou possíveis distorções geométricas. Destaca-se que o objetivo da pesquisa foi apresentar e analisar a confiabilidade dos dados da técnica InSAR, e não a performance e estabilidade da estrutura geotécnica em estudo.

3.2.4 TRATAMENTO DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE MONITORAMENTO TRADICIONAL: ETR

Para a Barragem A, com o objetivo de analisar o deslocamento acumulado total de todos os prismas e comparar com os dados do InSAR, foram utilizadas as médias diárias das leituras dos prismas na direção EW e vertical, direções similares às decomposições vetoriais dos dados do InSAR. Uma vez que a ETR instalada próxima à barragem utiliza como sistema de orientação “*Orientation Only*”, qualquer movimentação do prisma de referência pode ocasionar movimentações horizontais nos prismas de monitoramento. Além disso, movimentações no marco de instalação da ETR e retiradas desse equipamento para manutenção e calibração, também podem influenciar em movimentações nos dados horizontais e verticais dos prismas de monitoramento.

Nesse contexto, foi necessário entender e distinguir as movimentações reais dos prismas ocasionados por movimentações na estrutura geotécnica das movimentações ocasionadas por motivos externos à estrutura. Movimentações por motivos externos são muitas vezes fáceis de se identificar, principalmente correlacionando com o histórico de eventos e manutenções das instrumentações e regiões do entorno. Quatro saltos presentes nos dados ocorreram devido à troca da ETR para manutenção e calibração durante o período de análise, em 13/04/2022, 13/07/2022, 25/09/2022 e 26/09/2022.

Posteriormente, foi realizado no presente estudo o reprocessamento dos dados de todos os prismas de monitoramento, com o objetivo de retirar os saltos por motivos externos, para isso, utilizou-se o *software* Microsoft Excel, uma ferramenta de análise e visualização de dados. Ressalta-se a necessidade de realizar o reprocessamento de forma individual, uma vez que devido à diferentes distâncias e ângulos dos instrumentos em relação à ETR, cada prisma apresenta diferentes magnitudes de saltos.

Para a Barragem B, o tratamento e reprocessamento dos dados não foi necessário devido a inexistência de saltos ocasionados por motivos externos.

3.2.5 ESTUDO DE COMPARAÇÃO DE DADOS INSAR E ETR

Com o objetivo de verificar a confiabilidade dos dados do InSAR, foi realizada, para a Barragem A e para a Barragem B, a análise comparativa dos dados de deslocamento vertical e EW, utilizando dados de InSAR e dos prismas instalados nas estruturas.

Para a Barragem A, após tratamento dos dados dos prismas, descritos no Subitem 3.2.4, foram analisados os deslocamentos acumulados dos prismas e do ponto InSAR mais próximo a cada prisma, considerando ambas as direções. Pontua-se que os pontos do InSAR selecionados para análise se encontravam entre 2 e 13 m dos prismas do barramento, dependendo de cada prisma, distâncias que podem ser consideradas curtas dado que a resolução espacial do dado de decomposição vetorial do InSAR é de 10 m x 10 m. Porém, para a análise dos dados na praia de rejeito, os pontos do InSAR mais próximos dos prismas se encontravam entre 5 e 57 m, dependendo do prisma, o que pode ter influenciado na comparação dos dados. Foi necessário um maior raio de análise para a seleção desses pontos devido à baixa recuperação de dados na praia de rejeito.

Seguiu-se para a comparação dos dados por meio da criação de um mapa de cores com dados integrados dos deslocamentos acumulados e velocidade de deslocamento anual obtidos pelas duas tecnologias, seguindo a abordagem proposta por Pimentel *et al.* (2021). Além disso, foram analisadas as séries temporais em termos de tendências e magnitudes observadas por ambas as tecnologias, em conjunto com os dados do pluviômetro da mina.

Também foram elaboradas análises visando obter a porcentagem de similaridade da magnitude de deslocamento dos dados dos prismas e InSAR para cada decomposição vetorial na Barragem A, com o objetivo de entender a proximidade dos dados e se existe maior similaridade de dados dos prismas e InSAR em alguma das decomposições.

Para a Barragem B, de forma a complementar a análise de comparação de dados, considerando uma estrutura com diferente orientação de crista, foram analisados os deslocamentos acumulados dos prismas e do ponto InSAR mais próximo a cada prisma, considerando ambas as direções. Pontua-se que os pontos do InSAR selecionados para análise se encontravam até 6 m dos prismas. A comparação dos dados foi realizada por meio da criação de mapa de cores com dados integrados de velocidade de deslocamento anual e as séries temporais, obtidos pelas duas tecnologias, em conjunto com os dados do pluviômetro da mina.

Para esses estudos, foram utilizados os *softwares* QGIS e Microsoft Excel, conforme Figura 3-6 e Figura 3-7. O QGIS é uma multiplataforma livre de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciado.

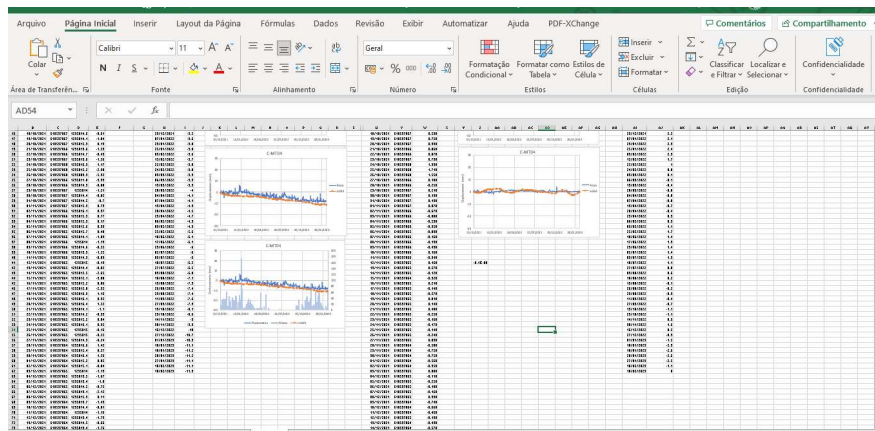


Figura 3-6 – Visão da tela da planilha de análise.

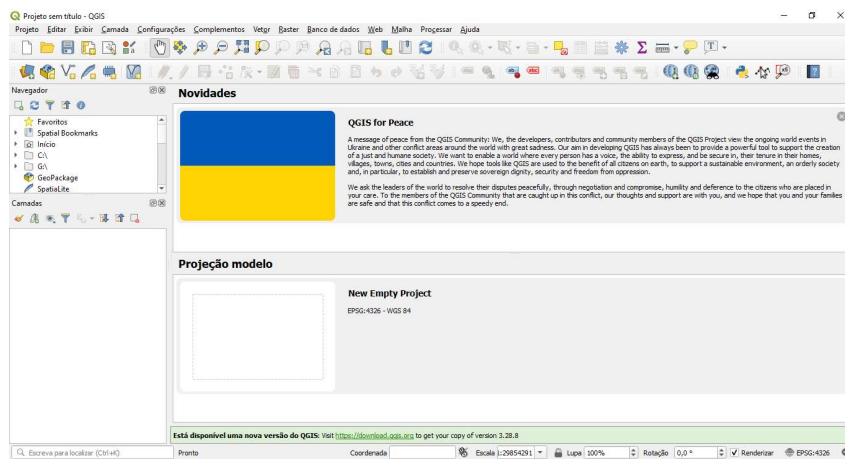


Figura 3-7 – Visão da tela do software de análise dos dados georreferenciados.

3.3 VALIDAÇÃO E POTENCIAL DE USO DO MONITORAMENTO POR RADAR ORBITAL INSAR

Com o objetivo de validar e aumentar o entendimento do potencial de uso do Radar Orbital InSAR e sua abrangência, foi realizada uma análise baseada na revisão bibliográfica, da utilização desse monitoramento em barragens e como o dado do InSAR pode ser relevante para determinadas situações.

Uma vez que a técnica possui limitações, como o a linha de visada do satélite e as decomposições vetoriais, a orientação da crista da estrutura influencia no significado do

deslocamento apresentado pelo dado EW do InSAR. Para uma barragem com crista orientada norte-sul, deslocamentos do InSAR na decomposição EW indicam deslocamentos na direção montante-jusante da barragem (ou vice-versa), enquanto para uma barragem com crista orientada EW, deslocamentos do InSAR na decomposição EW indicam deslocamentos na direção ombreira-ombreira. Sendo assim, é importante entender a relação entre a geometria da estrutura com o dado do InSAR para uma melhor análise.

Visando um maior entendimento da aplicabilidade do dado do InSAR para diferentes situações, foi realizada uma análise de orientação da crista de 42 estruturas de mineração, localizadas em Minas Gerais. As orientações foram divididas em três grupos, de acordo com a angulação, apresentadas na Figura 3-8. Barragens com crista orientada entre $-22,5^\circ$ e $22,5^\circ$ (preferencialmente norte-sul) foram classificadas como grupo A, barragens com crista orientada entre $22,5^\circ$ e $67,5^\circ$ (preferencialmente nordeste-sudoeste) ou $112,5^\circ$ e $157,5^\circ$ (preferencialmente noroeste-sudeste) foram classificadas como grupo B e barragens com crista orientada entre $67,5^\circ$ e $112,5^\circ$ (preferencialmente leste-oeste) foram classificadas como grupo C, conforme a Figura 3-8.

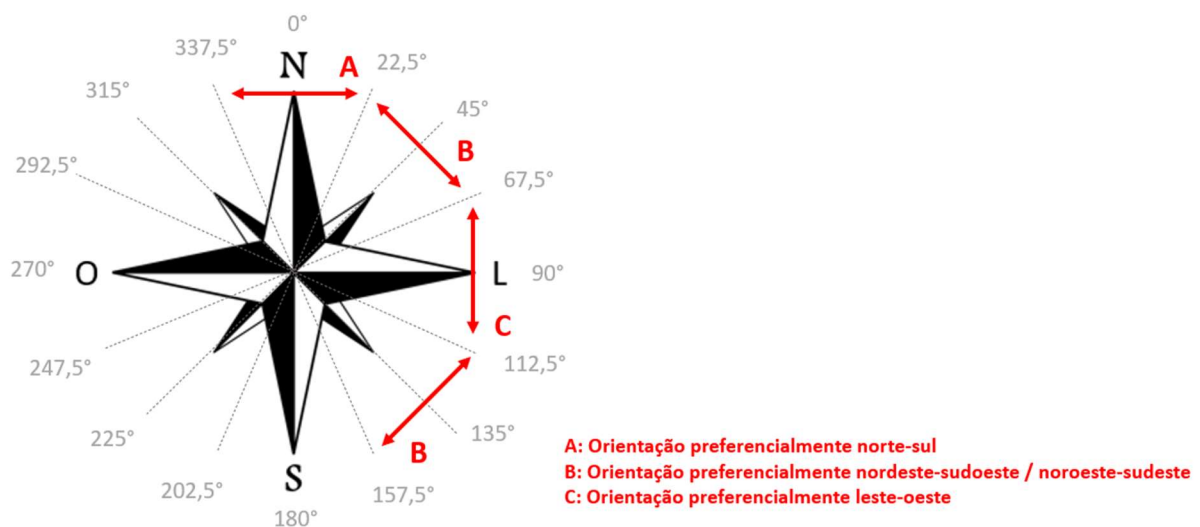


Figura 3-8 – Método de classificação em grupo A, B e C de acordo com a orientação da crista das barragens analisadas.

A Figura 3-9 apresenta um exemplo de classificação para a Barragem A, que possui a crista orientada aproximadamente EW, por isso, foi classificada como grupo C, sendo assim, deslocamentos do InSAR na decomposição EW indicam para essa estrutura deslocamentos na direção ombreira-ombreira.

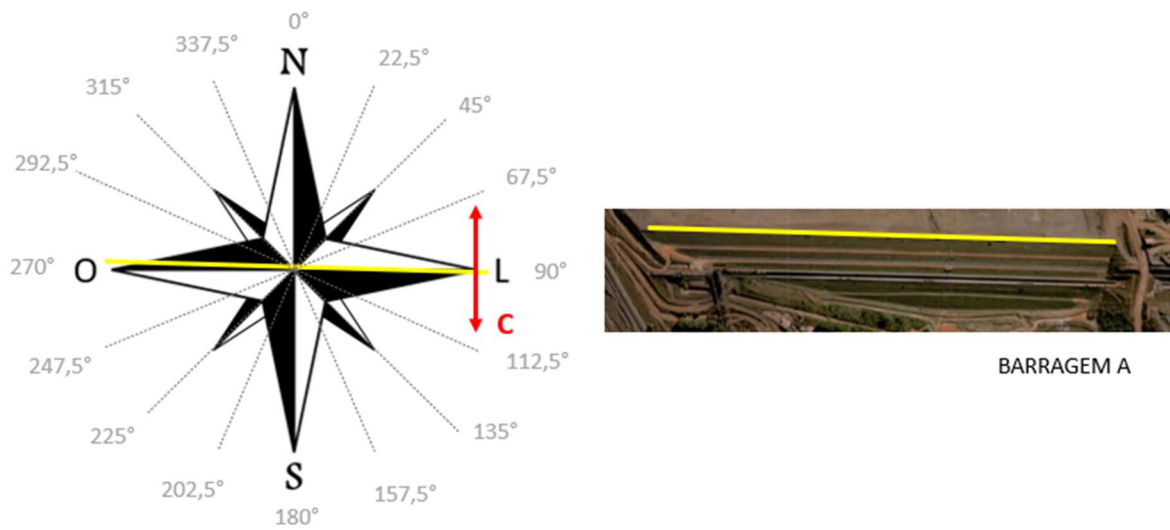


Figura 3-9 – Exemplo de classificação em grupo C de acordo com a orientação da crista da Barragem A, aproximadamente EW.

Essa análise visou um maior entendimento do significado dos dados EW entregues pela técnica InSAR aplicados em um panorama de monitoramento de barragens.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para a análise de aplicabilidade dos dados do InSAR e a análise da confiabilidade dos dados do InSAR. Por fim, são apresentados os resultados da análise de potencial de uso do monitoramento por essa técnica.

4.1 ANÁLISE DE APLICABILIDADE

Com o objetivo de contribuir para um maior entendimento da capacidade de entrega e limitações da técnica InSAR com relação a aplicabilidade do monitoramento para cada um dos principais modos de falha estudados e possíveis detecções de anomalias, foram criadas tabelas de aplicabilidade desse monitoramento baseados na revisão bibliográfica realizada.

A Tabela 4-1 apresenta quatro dos principais modos de falha, sendo esses galgamento, erosão interna, instabilidade e liquefação, e suas possíveis causas, conforme descrito por Tavares (2020) e apresentado na Tabela 2-2 do Item 2.2 da Revisão Bibliográfica. A partir disso, correlacionou-se na tabela o monitoramento via InSAR com a possibilidade de identificação dessas causas/anomalias ou de regiões suscetíveis de ocorrência dessas causas/anomalias, classificando o InSAR como um monitoramento desejável, complementar ou não aplicável para tais identificações. Foi considerado para essa análise as constelações TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed, de banda X. Para cada correlação, após análise e classificação, foi apresentada uma justificativa técnica.

Pontua-se que foi analisada a possibilidade de identificação via InSAR de cada causa propriamente descrita, e não das consequências que podem ser desencadeadas a partir daquela causa. Por exemplo, sismos naturais e induzidos não são possíveis de serem identificados pela técnica InSAR, classificando esse monitoramento como não aplicável, apesar de os deslocamentos lentos que possam ser provenientes desses sismos serem passíveis de identificação.

Tabela 4-1 - Aplicabilidade do monitoramento via InSAR x detecção de possíveis causas precursoras dos principais modo de falha.

MODOS DE FALHA E POSSÍVEIS CAUSAS (Tavares, 2020)		MONITORAMENTO VIA INSAR			JUSTIFICATIVA TÉCNICA
MODOS DE FALHA	CAUSA	DESEJÁVEL	COMPLEMENTAR	NÃO APLICÁVEL	
Galgamento	Volume para trânsito de cheias insuficiente			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
	Instabilidade dos taludes no entorno do reservatório e vertedouro		x		Possibilidade de detecção de movimentos lentos¹ sujeito ao tempo de revisita do satélite², desde que a vegetação não seja limitante. Técnica tem como limitação vegetação densa e arbustiva. Impossibilidade de identificação de movimentações puramente norte-sul ³ .
	Capacidade de descarga do sistema extravasor insuficiente			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.

MODOS DE FALHA E POSSÍVEIS CAUSAS (Tavares, 2020)		MONITORAMENTO VIA INSAR			JUSTIFICATIVA TÉCNICA
MODOS DE FALHA	CAUSA	DESEJÁVEL	COMPLEMENTAR	NÃO APLICÁVEL	
Galgamento	Deformação excessiva do maciço	x			Possibilidade de detecção de deslocamentos lentos¹ de longo prazo e recalques, que podem reduzir a borda livre do reservatório, e no caso de cheias, contribuir para um possível galgamento.
Erosão Interna	Ausência de drenagem interna			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
	Deformações excessivas, com trincas	x			Possibilidade de detecção de deslocamentos lentos¹ a longo prazo e recalques diferenciais, indicando possíveis locais de formação de trincas, que poderiam criar caminhos preferenciais de fluxo de água. Trincas de pequenas extensões podem não ser identificados devido a resolução espacial ⁴ .
	Sistema de drenagem interna existente insuficiente			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.

MODOS DE FALHA E POSSÍVEIS CAUSAS (Tavares, 2020)		MONITORAMENTO VIA INSAR			JUSTIFICATIVA TÉCNICA
MODOS DE FALHA	CAUSA	DESEJÁVEL	COMPLEMENTAR	NÃO APLICÁVEL	
Erosão Interna	Materiais com potencial de erodibilidade ou instabilidade interna			x	Impossibilidade de identificação com a técnica, possibilidade apenas no caso de manifestação da instabilidade na superfície.
	Zona de alta permeabilidade e ou ausência no tratamento de fundação			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
	Materiais enterrados			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
Instabilidade	Baixa resistência dos materiais			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
	Erosões e deformações	x			Possibilidade de detecção de movimentos lentos¹ , sujeito ao tempo de revisita do satélite ² . Capaz de identificar modificação de tendências de deslocamento e recalques diferenciais. Impossibilidade de identificação de movimentações puramente norte-sul ³ .

MODOS DE FALHA E POSSÍVEIS CAUSAS (Tavares, 2020)		MONITORAMENTO VIA INSAR			JUSTIFICATIVA TÉCNICA
MODOS DE FALHA	CAUSA	DESEJÁVEL	COMPLEMENTAR	NÃO APLICÁVEL	
Instabilidade	Sismo natural ou induzido			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
	Poropressão elevada			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
Liquefação	Carregamento rápido			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
	Abalo sísmico ou vibrações induzidas			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.
	Aumento das tensões cisalhantes			x	Impossibilidade de identificação com a técnica.

OBSERVAÇÕES:

- **¹ Deslocamentos lentos:** Deslocamentos mensuráveis estão limitados por medições consecutivas que não excedam meio comprimento de onda (banda X, $\lambda=3,1\text{cm}$), o que levaria a ambiguidade nas medições de fase; Ou seja, $1,5\text{ cm} / 11\text{ dias} = 1,4\text{ mm/dia}$
- **² Tempo de revisita do satélite:** Aproximadamente 11 dias (TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed);
- **³ Identificação de movimentações puramente norte-sul:** o InSAR não fornece medidas claras de deformação horizontal na direção norte-sul, o satélite orbita a Terra em uma órbita subpolar com um ângulo de visada de abertura sintética EW.
- **⁴ Resolução espacial:** um pixel equivale a 9 m^2 em órbita ascendente e descendente e, por convenção, 100 m^2 na decomposição vetorial vertical e EW. (TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed)

Apesar do monitoramento de deslocamentos não ser considerado um monitoramento direto para alguns dos principais modos de falha, como é observado no Item 2.2 (IBRAM, 2019), ao analisar possíveis causas que poderiam levar a um modo de falha de uma estrutura geotécnica (Tavares, 2020), observa-se que o monitoramento de deslocamento é crucial para identificação prévia de diversas anomalias ou locais suscetíveis ao desenvolvimento de anomalias. Nesse sentido, o monitoramento via InSAR se mostra importante para o monitoramento de diversos modos de falha.

Conforme foi analisado e apresentado na Tabela 4-1, o Galgamento, por exemplo, não tem como monitoramento direto o monitoramento de deslocamentos, mas uma perda de borda livre por recalque ou instabilidade dos taludes no entorno do reservatório ou extravasor são possíveis precursores desse modo de falha e poderiam ser monitorados pela técnica InSAR. Deformações excessivas com trincas, como possível causa do modo de falha de erosão interna, também podem ser identificáveis pela técnica InSAR, considerando certas limitações destacadas na tabela, como a resolução espacial.

Sendo assim, é possível classificar o monitoramento via InSAR como desejável e complementar para identificação prévia de causas ou locais suscetíveis a ocorrência de causas dos modos de falha de instabilização, galgamento e erosão interna, segundo os dados analisados.

Porém, é importante ressaltar que possíveis causas de modos de falha devem ser analisadas no cenário global em que a estrutura está inserida. Deformações excessivas com redução de borda livre só podem ser consideradas uma possível causa de modo de falha, se o nível de água no reservatório for suficiente para ocasionar um possível transbordamento. Instabilidade dos taludes no entorno do vertedouro só pode ser considerada uma possível causa de modo de falha se a estrutura estiver vertendo, enquanto instabilidade dos taludes no entorno do reservatório pode ser considerada uma possível causa de modo de falha se, por exemplo, o reservatório for assoreado ou se uma onda gerada pela ruptura do talude no entorno desse reservatório for suficiente para ocasionar um transbordamento.

Sendo assim, o InSAR, em conjunto com inspeções em campo, também pode ser muito importante e estratégico para desencadear planos de ação relacionados a instalação de equipamento de monitoramento crítico, manutenções corretivas ou possíveis obras de ajuste de projeto ou retaludamento. No caso de recalque da crista com consequente redução de borda livre, por exemplo, essa identificação pode levar a criação de um plano de manutenção corretiva, visando ajuste de projeto e adequação da altura da crista da estrutura. No caso de

instabilidade dos taludes no entorno do vertedouro e reservatório, essa identificação precoce pode desencadear planos de ação relacionados a obras de retaludamento, por exemplo.

Reforça-se também que a técnica InSAR mede deslocamentos, sendo muito importante o especialista analisar os dados avaliando o cenário global de todas as possíveis causas e consequências de deslocamentos que estejam ocorrendo nas estruturas geotécnicas, visando entender o porquê desse comportamento estar ocorrendo, uma vez que pode estar associado a diferentes anomalias e modos de falha.

Levando em consideração a necessidade de análise recorrente do Estado de Conservação das estruturas geotécnicas (ANM, 2023) e possíveis anomalias a serem observadas em uma inspeção visual (ANA, 2016), a Tabela 4-2 elenca possíveis anomalias de uma barragem de terra, correlacionando com a aplicabilidade do monitoramento via InSAR na detecção dessa anomalia ou na detecção prévia de regiões suscetíveis a formações dessas anomalias. Com isso, assim como na Tabela 4-1, o monitoramento via InSAR foi classificado como desejável, complementar ou não aplicável e para cada correlação, foi apresentada uma justificativa técnica.

Tabela 4-2 - Aplicabilidade do monitoramento via InSAR x detecção de possíveis anomalias em uma barragens de terra.

POSSÍVEIS ANOMALIAS	MONITORAMENTO VIA INSAR			JUSTIFICATIVA TÉCNICA
	DESEJÁVEL	COMPLEMENTAR	NÃO APLICÁVEL	
Trincas longitudinais e transversais no barramento	x			Possibilidade de detecção de deslocamentos lentos¹ e recalques diferenciais, sujeito ao tempo de revisita do satélite², indicando possíveis locais de formação de trincas. Trincas de pequenas extensões podem não ser identificadas devido a resolução espacial ³ .
Trinca nas ombreiras		x		Possibilidade de detecção de movimentos lentos¹ sujeito ao tempo de revisita do satélite², desde que a vegetação não seja limitante. Técnica tem como limitação vegetação densa e arbustiva e, a resolução espacial ³ .
Fissuras por ressecamento			x	Impossibilidade de identificação de fissuras de pequenas extensões devido a resolução espacial ³ .
Afundamentos, abatimentos e buracos	x			Possibilidade de detecção de movimentos lentos¹, sujeito ao tempo de revisita do satélite². Porém, buracos e afundamentos de pequenas extensões podem não ser identificados devido a resolução espacial ³ .

POSSÍVEIS ANOMALIAS	MONITORAMENTO VIA INSAR			JUSTIFICATIVA TÉCNICA
	DESEJÁVEL	COMPLEMENTAR	NÃO APLICÁVEL	
Recalques	x			Possibilidade de detecção de movimentos lentos¹, sujeito ao tempo de revisita do satélite²
Ravinamento ou erosão	x			Possibilidade de detecção de movimentos lentos¹, sujeito ao tempo de revisita do satélite² , limitado a resolução espacial ³ .
Desabamentos e colapsos (Movimentos rápidos)		x		Possibilidade de detecção de movimentos lentos ¹ , sujeito ao tempo de revisita do satélite ² , com identificação de modificação de tendências de deslocamento. Não possibilita monitoramento em tempo real, detecção de deslocamento rápido¹ e na direção puramente norte-sul⁴.
Deslizamentos de taludes, escorregamentos	x			Possibilidade de detecção de movimentos lentos¹, sujeito ao tempo de revisita do satélite² . Capaz de identificar modificação de tendências de deslocamento. Impossibilidade de identificação de movimentações rápidas ¹ e puramente norte-sul ⁴ .

POSSÍVEIS ANOMALIAS	MONITORAMENTO VIA INSAR			JUSTIFICATIVA TÉCNICA
	DESEJÁVEL	COMPLEMENTAR	NÃO APLICÁVEL	
Falha na proteção dos taludes (revestimento) ou enrocamento de proteção		x		Possibilidade de detecção de movimentos lentos¹ sujeito ao tempo de revisita do satélite² e limitado a resolução espacial ³ e movimentações puramente norte-sul ⁴ .
Surgências no talude de jusante e áreas molhadas			x	Impossibilidade de identificação , ausência de dados na presença de água ou umidade excessiva.
Infiltração na interface aterro ombreira			x	Impossibilidade de identificação pela técnica.
Fugas de água, vazões na fundação			x	Impossibilidade de identificação pela técnica.
Carreamento de material nas águas dos drenos			x	Impossibilidade de identificação pela técnica.
Canaletas quebradas ou obstruídas		x		Possibilidade de identificação de movimentos lentos¹, sujeito a dimensão da canaleta quebrada. Impossibilidade de identificação de obstrução.
Formigueiro, cupinzeiros ou tocas de animais			x	Impossibilidade de identificação pela técnica , limitado a resolução espacial ³ .

POSSÍVEIS ANOMALIAS	MONITORAMENTO VIA INSAR			JUSTIFICATIVA TÉCNICA
	DESEJÁVEL	COMPLEMENTAR	NÃO APLICÁVEL	
Presença de vegetação arbustiva ou arbóreas			X	Impossibilidade de identificação pela técnica. A banda X tem como limitação vegetação densa e arbustiva, não recuperando pontos. Perda de pontos podem ser indicativos de crescimento de vegetação. Satélites com Banda L podem ser mais adequados em áreas cobertas por vegetação.

OBSERVAÇÕES:

- ¹ **Deslocamentos lentos:** Deslocamentos mensuráveis estão limitados por medições consecutivas que não excedam meio comprimento de onda (banda X, $\lambda=3,1\text{cm}$), o que levaria a ambiguidade nas medições de fase;
- ² **Tempo de revisita do satélite:** Aproximadamente 11 dias (TerraSAR-X ou COSMO-Skymed);
- ³ **Resolução espacial:** um pixel equivale a 9 m^2 em órbita ascendente e descendente e 100 m^2 na decomposição vetorial vertical e EW. (TerraSAR-X ou COSMO-Skymed).
- ⁴ **Identificação de movimentações puramente norte-sul:** o InSAR não fornece medidas claras de deformação horizontal na direção norte-sul, o satélite orbita a Terra em uma órbita subpolar com um ângulo de visada de abertura sintética EW.

Pode-se observar que para alguns casos o monitoramento via InSAR é claramente considerado como não aplicado, isso ocorre uma vez que é um monitoramento de deslocamentos, que possui limitações espaciais, temporais e geométricas, além de limitações quanto a presença de vegetações e de água. Por exemplo, não é possível detectar fissuras por ressecamento ou formigueiros e cupinzeiros uma vez que essas anomalias possuem pequenas dimensões e a resolução espacial do InSAR para as constelações TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed equivalem a 9 m² em órbita ascendente e descendente e 100 m² na decomposição vetorial vertical e EW.

Em outros casos, o monitoramento pode ser considerado complementar, uma vez que pode apoiar na identificação de anomalias, porém, outras tecnologias são necessárias para maiores análises. No caso de desabamentos e colapsos, por exemplo, que são movimentos rápidos, apesar de possibilitar a identificação de mudança de tendência de deslocamento e aumento da velocidade, ocorre perda de recuperação de pontos com o aumento expressivo da velocidade de deslocamento, devido à ambiguidade de fase. Como mencionado na revisão bibliográfica, os deslocamentos mensuráveis estão limitados por medições consecutivas que não excedam meio comprimento de onda. Considerando a constelação TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed, sensores de banda X, meio comprimento de onda é equivalente a um deslocamento entre 0 cm e 1,5 cm no intervalo de duas aquisições de imagens, em torno de 11 dias. Por isso, o InSAR é considerado um monitoramento complementar e estratégico para detecção de desabamentos e colapsos, podendo indicar a melhor localização para a instalação de um monitoramento em tempo real ou quase real, como um radar terrestre.

No caso de identificações de movimentos lentos e em maiores extensões ou anomalias que podem ter origem desses movimentos, como trincas de recalques diferenciais, o monitoramento via InSAR é considerado desejável e muito importante, uma vez que pode entregar dados confiáveis, a baixo custo, em grandes extensões e sem necessidade de equipamentos em campo.

4.2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE - ESTUDO DE CASO

A análise de confiabilidade do Radar Orbital InSAR é apresentada nos subitens a seguir. Com o objetivo de confirmar a confiabilidade dos dados e aumentar o entendimento da técnica, foi utilizado e comparado dados de duas tecnologias em duas barragens, considerando o período de análise de outubro de 2021 à fevereiro de 2023. Foram utilizados os dados do InSAR, principal alvo de estudo, dos prismas instalados nas estruturas e do pluviômetro da mina.

4.2.1 ANÁLISE DE COERÊNCIA E NÍVEL DE RUÍDO

A coerência do sinal é um parâmetro associado à qualidade do sinal coletado sendo utilizado como critério mínimo de aceitação de um dado. De modo geral, a Barragem A apresenta boa recuperação de pontos, sendo que a a melhor cobertura ocorre na região em que há instalada uma estrutura de metal, provavelmente devido ao fato de que estruturas de metal apresentam alta refletividade e fornecem um melhor retorno do sinal.

O limite mínimo de coerência dos dados é de 0,50, sendo 1,00 a condição ótima de monitoramento, ou seja, pontos abaixo do valor de 0,50 de coerência foram filtrados e não recuperados no processamento dos dados do InSAR. A Figura 4-1 e a Figura 4-2 apresentam os valores de coerência para a Barragem A no período de estudo. A primeira e a segunda imagem mostram os mapas de dados de coerência da órbita ascendente e descendente, respectivamente. Valores entre 0,60 e 0,70 são observados para a barragem como um todo, enquanto para estrutura metálica, os valores estão entre 0,7 e 1,0, devido à alta refletividade do material. Há poucos pontos classificados com valores de coerência entre 0,55 e 0,60 e nenhum ponto com valores abaixo de 0,55.



Figura 4-1 – Mapa de coerência dos dados da órbita ascendente (ASC) do monitoramento InSAR para a Barragem A.



Figura 4-2 – Mapa de coerência dos dados da órbita descendente (DESC) do monitoramento InSAR para a Barragem A.

Destaca-se a importância de conhecer esses valores para um rápido e melhor entendimento dos dados caso ocorra perda de pontos entre duas entregas. Pontos com constantes valores baixos de coerência possuem maiores probabilidades de não serem recuperados em entregas seguintes que pontos com altos valores de coerência. Esses baixos valores podem ocorrer, por exemplo, devido a perturbação da superfície, vegetação, águas, terrenos alagados. A perda de pontos que possuíam um valor de coerência alto pode ocorrer devido aos motivos descritos anteriormente, como também, podem indicar algum comportamento de deslocamento anômalo, como movimentos rápidos que acarretam ambiguidade de fase. Nesse último caso é importante um entendimento do histórico dos dados e do comportamento de outras tecnologias de monitoramento disponíveis no local, além do comportamento de deslocamento esperado para a estrutura geotécnica analisada.

A Figura 4-3 apresenta, para o período de outubro de 2021 a fevereiro de 2023, o intervalo entre cada revisita de satélite para aquisição de dados na órbita descendente e ascendente do InSAR, o que influencia na resolução temporal dos dados e consequentemente na coerência. Um maior intervalo de revisita do satélite, por exemplo, pode contribuir para eventos de ambiguidade de fase, diminuindo a recuperação de dados.

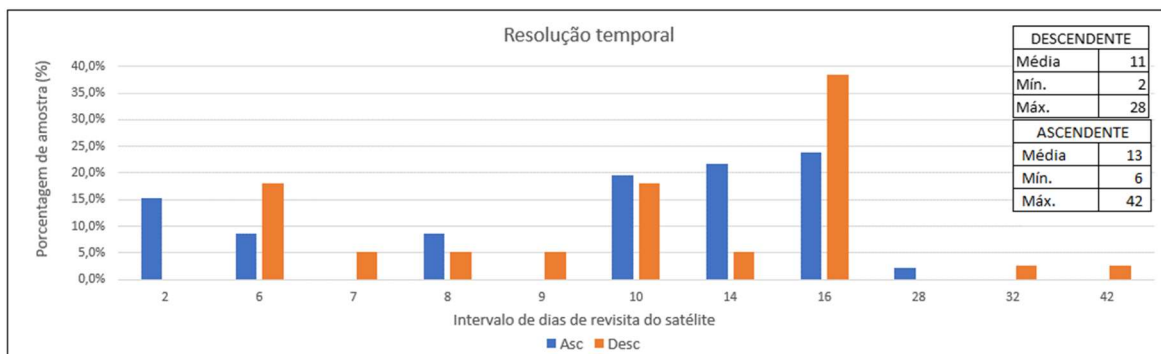


Figura 4-3 – Intervalo de dias de revisita do satélite para aquisição de dados de InSAR em órbita ascendente e descendente.

Foi possível verificar uma média entre o intervalo de dias para revisita do satélite de 11 dias para a órbita ascendente e 13 dias para a órbita descendente, com intervalos mínimos de 2 dias e máximos de 42 dias, considerando ambas as órbitas. 38% das revisitas do satélite na órbita descendente, por exemplo, ocorreram com intervalos de 16 dias. Essas variações no intervalo de tempo para aquisição dos dados impactam diretamente na qualidade dos resultados e na recuperação de dados, pois podem reduzir significativamente a coerência temporal dos dados e aumentar as chances de ocorrência de eventos de ambigüidade de fase, uma vez que o deslocamento máximo medido entre as revisitas do satélite é limitado a meio comprimento de onda.

Para obtenção do nível de ruído de monitoramento, foram selecionados pontos em extensas áreas em terreno natural, considerados estáveis, próximos a Barragem A, marcados em amarelo na Figura 4-4. A velocidade de deslocamento (mm/ano) dos pontos selecionados é apresentada no histograma.

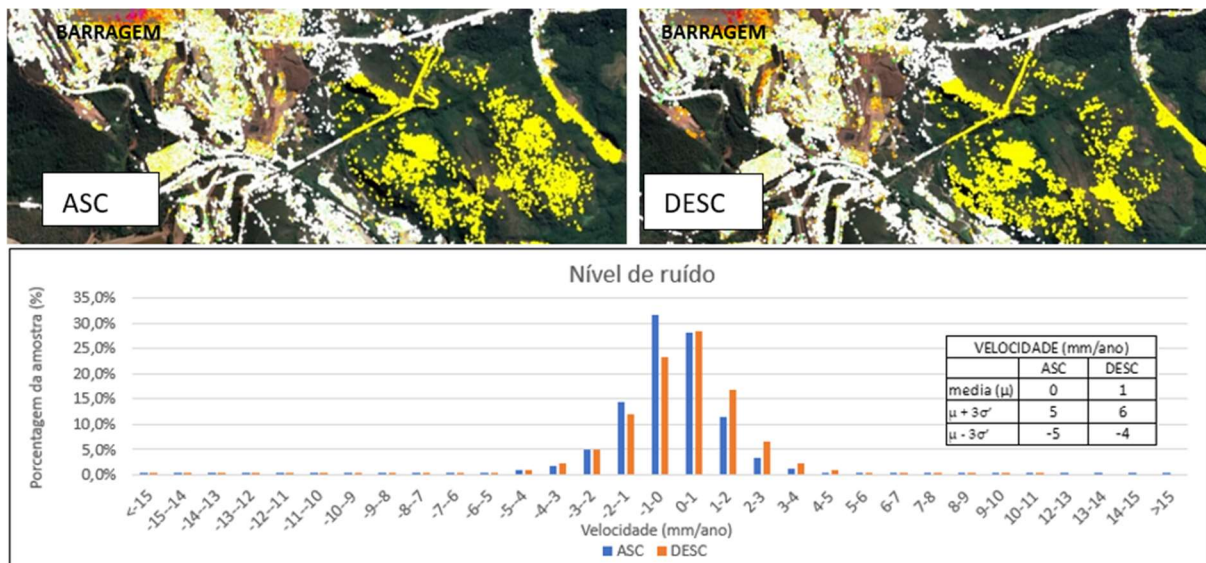


Figura 4-4 – Mapa e histograma de velocidade de deslocamento nos levantamentos Ascendente e Descendente da área selecionada próxima a Barragem A.

A média da velocidade de deslocamento obtida é zero mm/ano para os pontos na órbita ascendente e 1 mm/ano na órbita descendente, considerando o intervalo de confiança de 99,7% dos dados ($\mu \pm 3\sigma$), observa-se que o nível de ruído do monitoramento é de cerca de ± 5 mm/ano da média, correspondente a 0-1 mm/ano. Ou seja, o nível de ruído obtido foi um valor próximo ao valor descrito como a precisão da técnica, ± 5 mm/ano.

A Figura 4-5 apresenta, para a mesma área estável, a variação da amplitude dos dados entre cada aquisição comparando as estações seca e chuvosa, para os dados da órbita ascendente do satélite. É possível observar uma baixa influência da sazonalidade nos dados, embora haja uma variação maior na amplitude dos dados no período chuvoso, a diferença é submilimétrica.

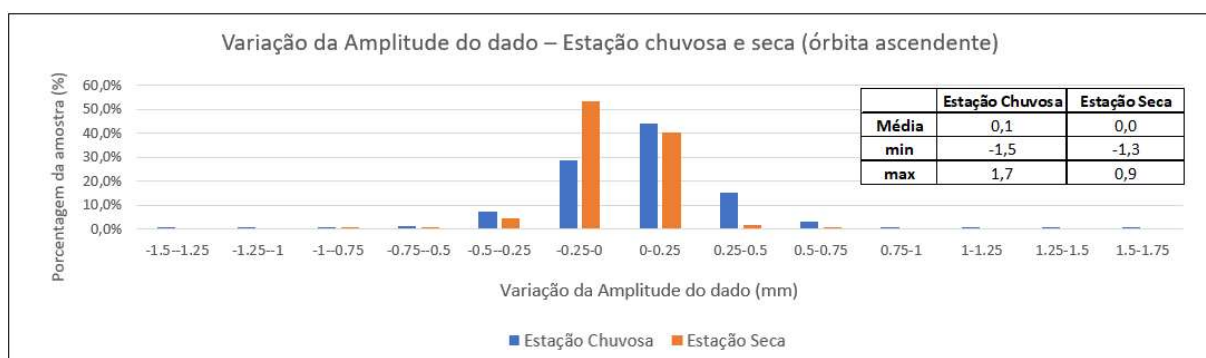


Figura 4-5 – Histogramas de variação da amplitude dos dados para a área selecionada de acordo com a sazonalidade - órbita ascendente.

4.2.2 DADOS RECUPERADOS EM DIFERENTES LINHAS DE VISADA

A Figura 4-6 apresenta os dados de InSAR do levantamento orbital ascendente e descendente de deslocamentos para Barragem A, para o período de outubro de 2021 a fevereiro de 2023. De modo geral, a estrutura apresenta boa recuperação de pontos. As regiões com pouca recuperação estão destacadas em vermelho e verde e serão analisadas a seguir.

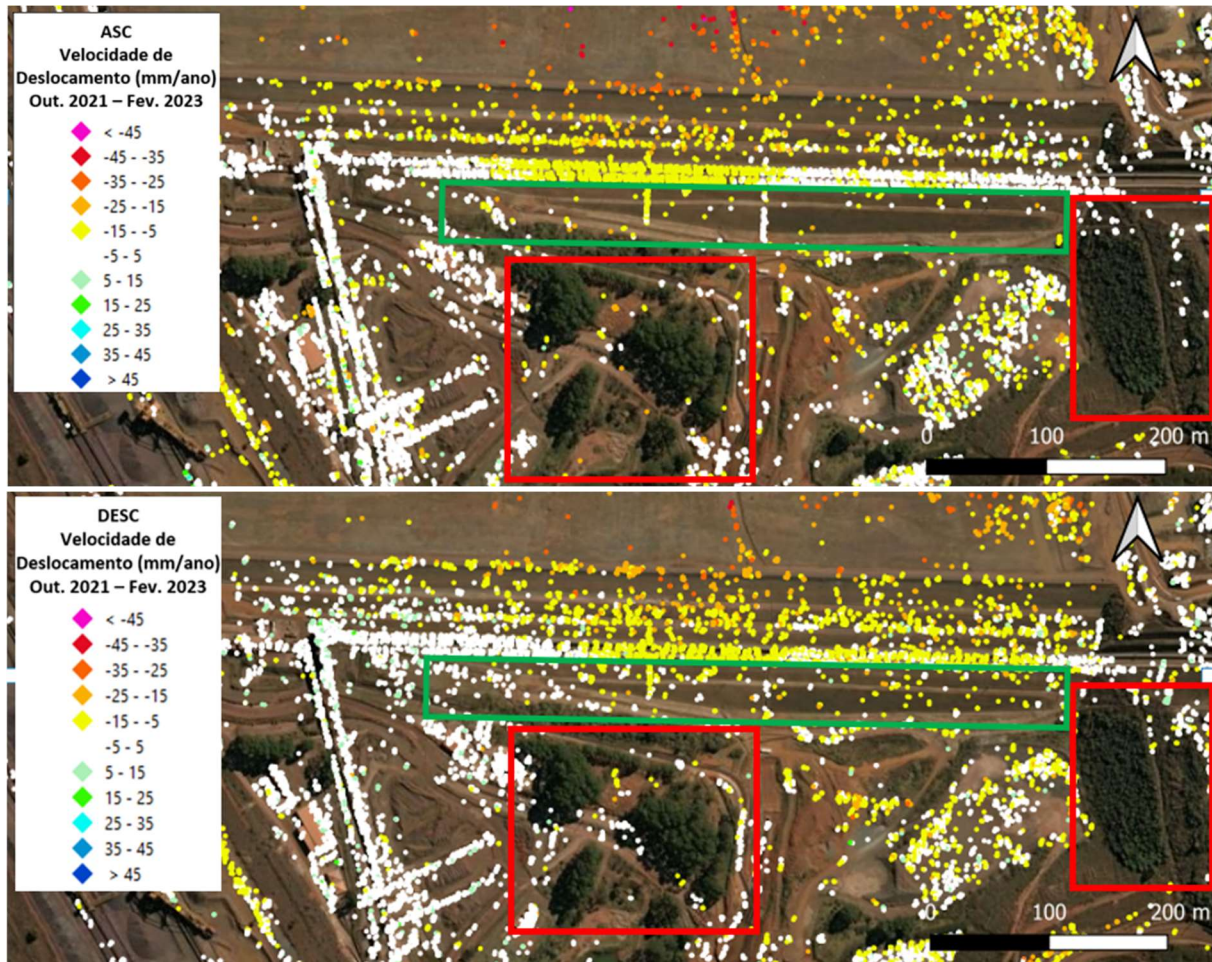


Figura 4-6 – Levantamento orbital ascendente e descendente de deslocamentos para a Barragem A.

Ressalta-se que os dados da órbita ascendente e descendente não apresentam valores de deslocamento absoluto real em termos de magnitude, mas sim na linha de visada do satélite, por isso, é importante analisar os dados de deslocamento em termos de tendências e mudanças nas magnitudes. Observa-se que a velocidade de deslocamento diminui na direção crista pé, apresentando majoritariamente pontos brancos e valores de deslocamento de -5 a -10 mm/ano na região inferior, menores que os observados próximo à crista, em torno de -10 a -30 mm/ano.

Uma vez que o InSAR possui limitações, observa-se algumas regiões sem ou com pouca recuperação de pontos. Algumas causas podem ser áreas densamente vegetadas e limitações em

função das relações geométricas entre a estrutura e as órbitas de passagem do satélite que fazem com que a densidade de pontos em ambas as órbitas ascendente e descendente possam não ser semelhantes.

Os retângulos em vermelho marcados na Figura 4-6, por exemplo, indicam áreas sem recuperação de pontos devido à existência de vegetação arbórea. Os retângulos em verde indicam pouca recuperação de pontos para os taludes inferiores da estrutura para a órbita de passagem ascendente, o que pode estar associado a uma relação geométrica desfavorável entre a estrutura e a órbita ascendente. Reforça-se que a técnica apresenta algumas limitações relacionadas a distorções geométricas, em declives muito íngremes o campo de visada oblíquo do satélite gera efeitos de sombreamento ou inversão de relevo, com compressão da área em poucos pixels, não fornecendo pontos de medição. Quando isso ocorre, normalmente, pelo menos uma geometria obtém pontos de medição nesses declives. Isso pode ser visto na Figura 4-6, em que há maior recuperação de pontos na órbita de passagem descendente que ascendente.

Além disso, ressalta-se que a inclinação dos dois taludes inferiores da Barragem A é diferente da inclinação dos taludes superiores, sendo mais íngremes, o que pode ter contribuído para uma menor recuperação de pontos nas duas órbitas para essa região, quando comparado às regiões superiores da estrutura.

Os dados de deslocamentos horizontais leste-oeste e verticais são obtidos por meio de decomposição vetorial dos pontos homólogos entre as órbitas ascendente e descendente, reamostrados por meio de uma grade regular (por convenção, 10 m x 10 m). Levando isso em consideração e o fato de que a órbita ascendente não apresenta boa recuperação de pontos para os taludes inferiores da estrutura, conseqüentemente, não há boa recuperação de pontos de deslocamentos horizontais leste-oeste e verticais para essa região.

A Figura 4-10 apresenta os dados do InSAR da decomposição vetorial de deslocamento leste-oeste e vertical para a Barragem A. A área de baixa recuperação de pontos, é sinalizada por um retângulo verde.

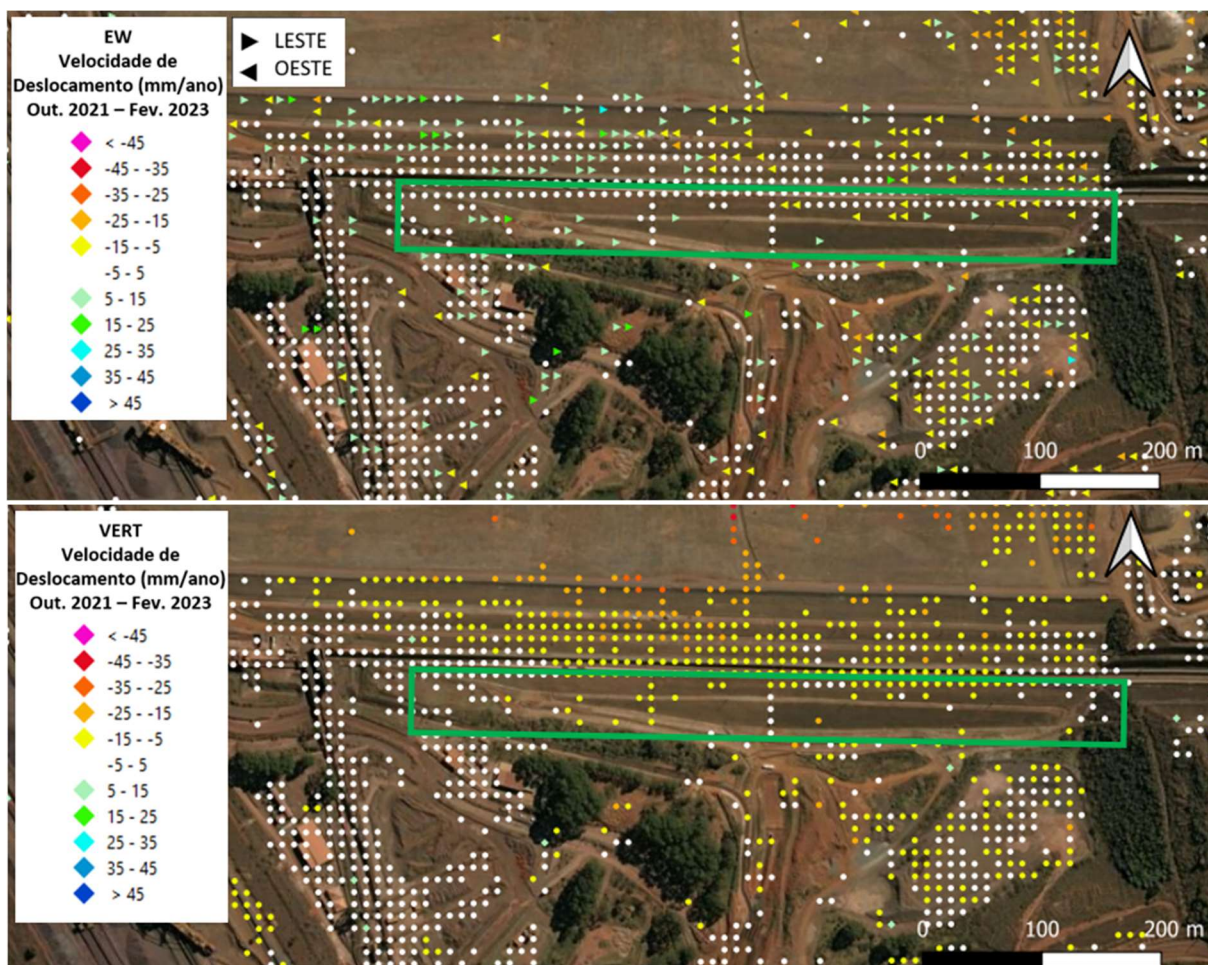


Figura 4-7 – Levantamento orbital de deslocamento EW e Vertical para a Barragem A.

Importante mencionar que devido à orientação leste-oeste da crista da estrutura e aos dados de decomposição vetorial horizontal entregues pelo InSAR também serem leste-oeste, qualquer deformação puramente montante-jusante (norte-sul) é difícil de discernir apenas com esta tecnologia, o que torna o levantamento por ETR, complementar ao InSAR.

De modo geral, pode-se observar dados estáveis, representados por pontos brancos, próximo às ombreiras e terreno natural, com valores de deslocamentos entre ± 5 mm/ano, dentro da precisão da técnica e do nível de ruído encontrado no Item 4.2.1.

Com relação aos dados verticais, pode-se observar maiores deslocamentos próximo a crista e região central, variando de -20 a -30 mm/ano, diminuindo em direção ao pé da estrutura e ombreiras, com valores de deslocamento de -5 a -10 mm/ano ou valores dentro da precisão da técnica e nível de ruído. Para os dados leste-oeste, observa-se majoritariamente pontos brancos e alguns pontos indicando deslocamentos entre -5 a -25 mm (oeste) e 5 a 25 mm (leste) para o mesmo período.

Observa-se que para os pontos em que os dados das órbitas ascendente e descendente apresentam o mesmo comportamento com ordem de magnitudes similares, como por exemplo os deslocamentos na região central da estrutura, a componente vertical é predominante, isso ocorre devido a decomposição vetorial das órbitas em vertical e leste-oeste.

É importante ressaltar também que é possível a obtenção de informações e análises de possíveis deslocamentos em estruturas que apresentam recuperação de pontos em apenas uma das visadas, ascendente ou descendente, como foi possível observar nos estudos de caso apresentados na revisão bibliográfica. Sendo assim, reforça-se a necessidade de analisar os dados de deslocamento em termos de tendências e mudanças de magnitudes.

4.2.3 TRATAMENTO DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE ETR

Com o objetivo de comparar os dados verticais e leste-oeste dos prismas monitorados pela ETR com os dados do InSAR, foi necessário realizar um entendimento e tratamento inicial dos dados dos prismas. Para a Barragem A, utilizou-se dados de média diária de deslocamento dos prismas, considerando o mesmo período de análise dos dados do InSAR. A utilização da média diária é ideal para redução de ruídos do monitoramento, permitindo uma melhor visualização das tendências de deslocamento a longo prazo observadas.

Identificou-se diversos saltos ocorridos nos dados desses prismas, por isso, foi necessário realizar, inicialmente, uma análise da influência externa de movimentação da ETR e prismas de referência, considerando o histórico de movimentos externos à estrutura e dos prismas de monitoramento. Foram identificados cinco momentos com necessidade de reprocessamento de dados, um deles devido a movimentação do prisma de referência, em 13/11/2021, sinalizado em verde na Figura 4-8 e outros quatro saltos correspondentes a troca de ETR para manutenção e calibração, sinalizados em vermelho, ocorridos em 13/04/2022, 13/07/2022, 25/07/2022 e 26/09/2022. Encontrou-se então, as magnitudes de cada um desses saltos para cada prisma por meio de cálculos considerando as medições dos dias anteriores e posteriores aos saltos, e então, todos os dados foram reprocessados utilizando o *software* Excel.

Uma vez que a ETR que monitora a Barragem A tem como modo de operação “*Orientation Only*”, saltos ocorridos em prismas de referência, utilizados para correção da orientação da ETR, implicam somente em variações horizontais nos dados dos prismas de monitoramento, por esse motivo, o salto em 13/11/2021 foi corrigido apenas nos dados leste-oeste. Os outros saltos foram corrigidos nos dados leste-oeste e vertical.

A Figura 4-8 exemplifica o processo de análise e reprocessamento realizado nos dados dos prismas, para isso, é apresentado como exemplo os saltos sinalizados nos dados de três prismas de monitoramento, destacados em vermelho, e no referencial. Como mencionado, esses saltos foram ocasionados por motivos externos à estrutura geotécnica e não devem ser considerados em uma análise de deslocamento da barragem.

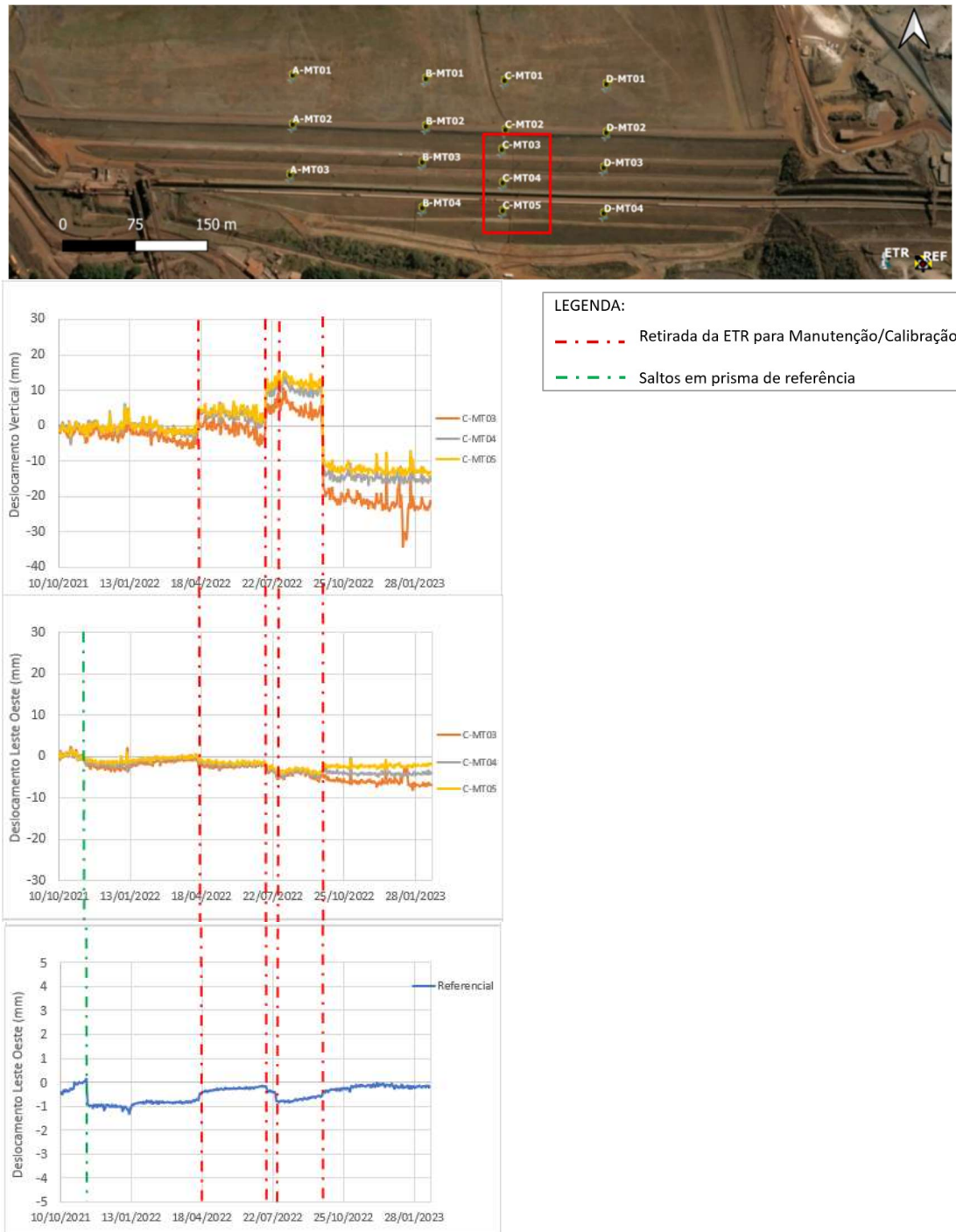


Figura 4-8 – Saltos ocasionados por motivos externos à estrutura geotécnica sinalizados nos dados do referencial e prismas de monitoramento (em vermelho no mapa).

A Figura 4-9 apresenta o resultado dos dados reprocessados desses prismas, após retirada dos saltos que não condizem com movimentações reais dos prismas e da estrutura. Esse procedimento foi realizado para todos os prismas da estrutura.

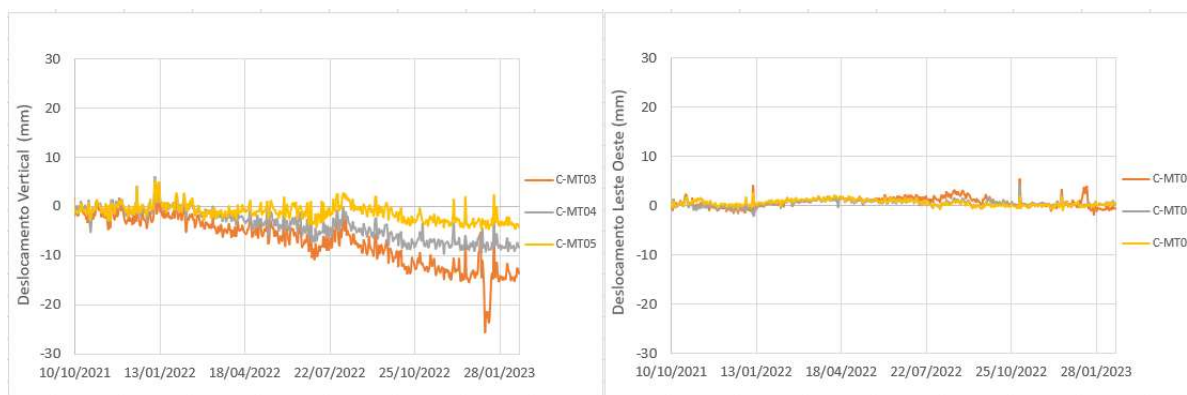


Figura 4-9 – Dados reprocessados dos prismas de monitoramento, sem saltos por motivos externos à estrutura geotécnica.

Com isso, é importante reforçar a necessidade durante o monitoramento de uma análise integrada de dados de todo o sistema de monitoramento, levando em consideração o histórico de manutenção e calibração, dos prismas de referência e do marco de instalação da ETR, visando distinguir o movimento real de uma estrutura do movimento de um sistema de monitoramento, externo à estrutura.

Para a Barragem B, o tratamento e reprocessamento dos dados não foi necessário devido a inexistência de saltos ocasionados por motivos externos.

4.2.4 COMPARAÇÃO DE DADOS INSAR E PRISMAS DE MONITORAMENTO

O primeiro estudo de caso compara os deslocamentos verticais e leste-oeste encontrados para os prismas e os dados do InSAR na Barragem A, visando confirmação da confiabilidade dos dados da técnica. A Figura 4-10 apresenta o mapa da estrutura com os dados de deslocamento vertical acumulado ocorrido para ambas as tecnologias e a Figura 4-11 os dados de velocidade de deslocamento anual, no período entre outubro 2021 e fevereiro 2023.

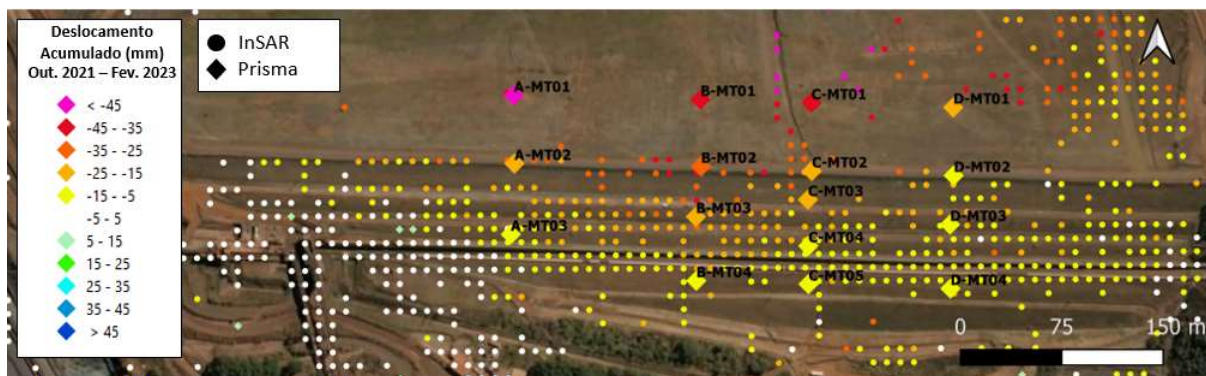


Figura 4-10 – Deslocamento vertical acumulado da Barragem A – InSAR e prismas de monitoramento.

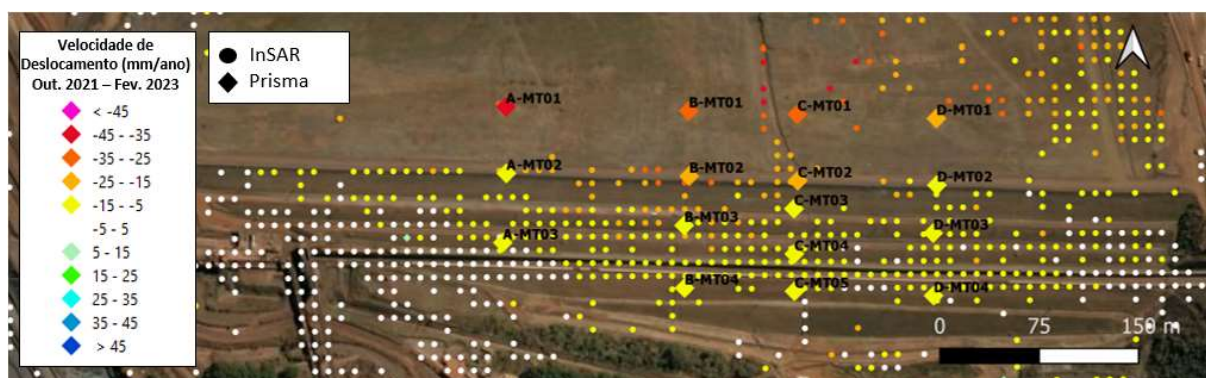


Figura 4-11 – Velocidade de deslocamento vertical (mm/ano) da Barragem A – InSAR e prismas de monitoramento.

Observa-se uma boa concordância dos dados, os prismas e os pontos do InSAR localizados próximos apresentam cores de legenda semelhantes tanto em termos de deslocamento acumulado quanto velocidade de deslocamento anual.

Com relação aos dados do mapa de deslocamento vertical acumulado, pode-se observar que para a região central da crista da estrutura os prismas e os pontos do InSAR localizados próximos apresentam valores de deslocamento em torno de -15 a -35 mm em 1 ano e 5 meses de monitoramento, sinalizados em diferentes tons de laranja. Para os dados a jusante, observa-se coloração amarela, ou seja, valores de deslocamento acumulado em torno de -5 a -15 mm para ambas as tecnologias no mesmo período. De forma geral, observa-se mudanças de magnitudes de deslocamento de forma gradual em toda a estrutura, assim como nos dados dos prismas.

Na análise do mapa de velocidade de deslocamento vertical, há predominância de coloração amarela e laranja claro para os prismas e pontos do InSAR, indicando velocidades de

deslocamento vertical em torno de -5 a -15 mm/ano para a região central inferior e próximo às ombreiras e -15 a -25 mm/ano para a região central superior.

A Figura 4-12 apresenta, para o mesmo período, a análise da série temporal de quatro prismas de uma seção selecionados no barramento em estudo, o C-MT02, C-MT03, C-MT04 e , C-MT05, em conjunto com o ponto do InSAR mais próximo desse instrumento, com o objetivo de comparar tendências e magnitudes observadas por ambas as tecnologias. Os dados do pluviômetro da mina complementam a análise.

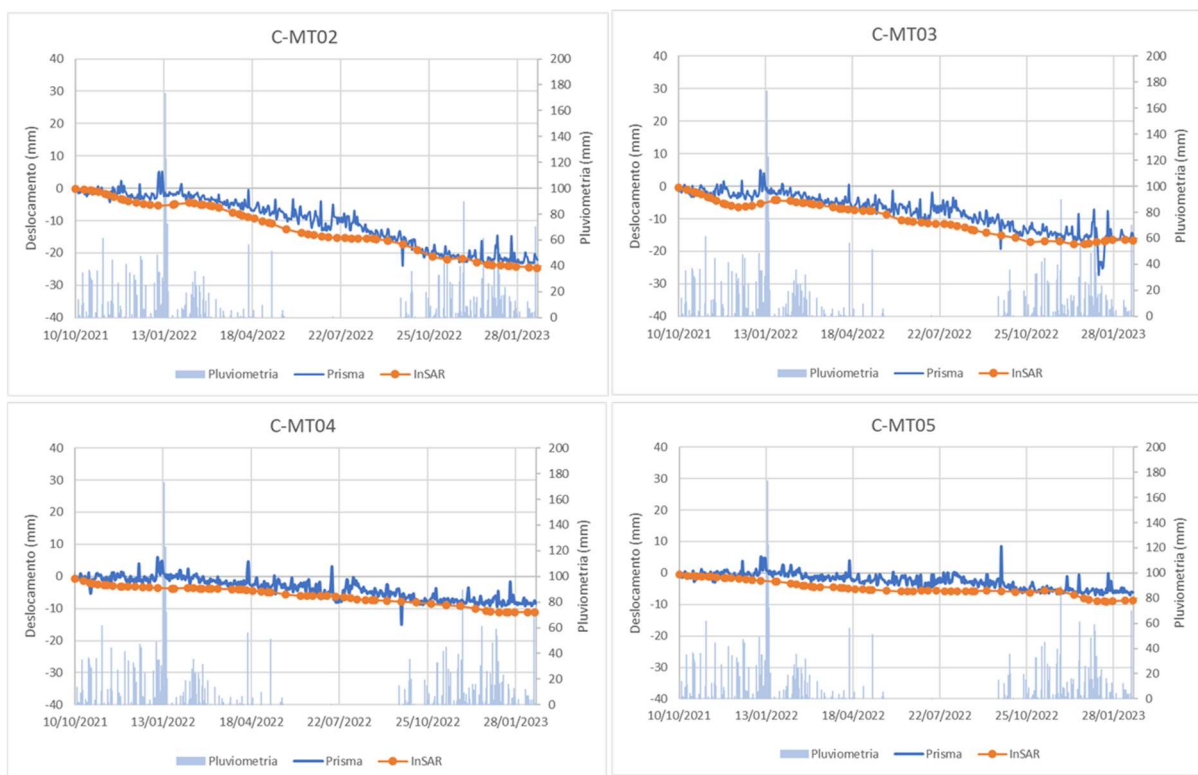


Figura 4-12 – Série temporal de deslocamento vertical de quatro prismas exemplo selecionados no barramento e do ponto do InSAR localizado mais próximo de cada prisma – Barragem A.

Nota-se uma alta similaridade quanto à magnitude e tendência dos deslocamentos apresentados nas séries temporais, há uma diferença máxima de 5 mm entre os dados de deslocamento acumulado do prisma e do ponto do InSAR mais próximo. Observa-se que os maiores deslocamentos ocorrem durante o período de estiagem, há tendência a estabilidade dos dados durante o período de maior pluviometria.

A Figura 4-13 apresenta o mapa da a Barragem A com os dados leste-oeste acumulados do InSAR e prismas de monitoramento durante o mesmo período, outubro 2021 a fevereiro 2023,

e, a Figura 4-14 o mapa de velocidade de deslocamento leste-oeste anual para ambas as tecnologias.

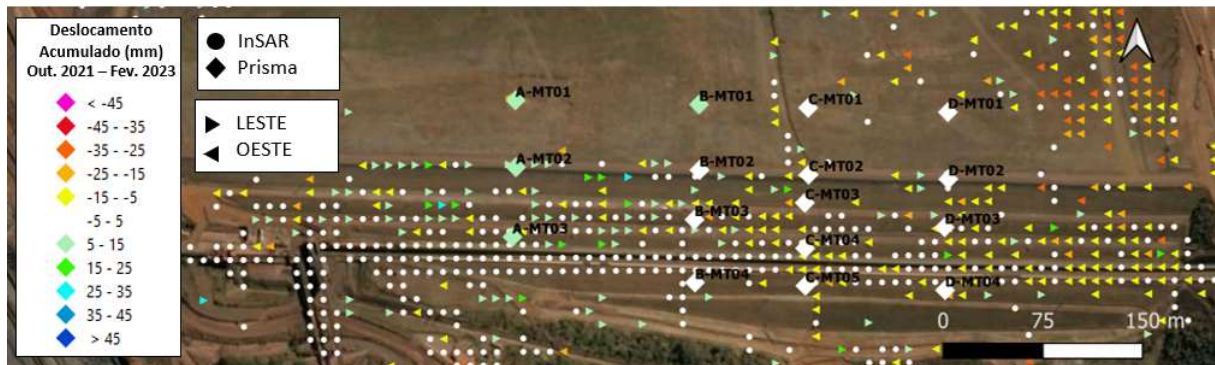


Figura 4-13 – Deslocamento leste-oeste acumulado da Barragem A – InSAR e prismas de monitoramento.

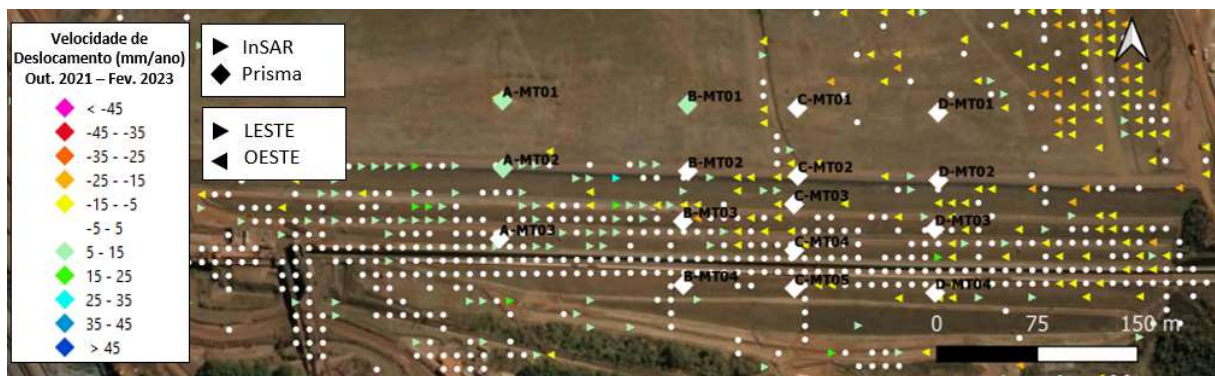


Figura 4-14 – Velocidade de Deslocamento leste-oeste (mm/ano) da Barragem A – InSAR e prismas de monitoramento.

De modo geral, observa-se uma menor correlação dos dados leste-oeste quando comparado aos dados de deslocamento vertical. Os prismas da região central apresentam valores de deslocamento em torno de ± 5 mm em 1 ano e 5 meses de monitoramento, enquanto alguns pontos do InSAR indicam valores semelhantes, representados por pontos branco, outros pontos indicam deslocamentos entre -5 a -25 mm (oeste) e 5 a 25 mm (leste) para o mesmo período. Os prismas localizados na seção A, a esquerda da imagem, apresentam deslocamentos acumulados de 5 a 15 mm, para leste. No caso do A-MT02, o mesmo pode ser observado para os pontos do InSAR localizados próximos, enquanto para os outros dois prismas, A-MT01 e A-MT03, observa-se pontos de InSAR com valores oscilando entre -25 a 15 mm de deslocamento acumulado.

O mapa de velocidade de deslocamento apresenta majoritariamente pontos brancos, que correspondem a valores de deslocamentos entre ± 5 mm/ano, considerado valores dentro da precisão da técnica e do nível de ruído encontrado nesse estudo. Os prismas também apresentam majoritariamente velocidades de ± 5 mm/ano. Há também alguns pontos do InSAR indicando velocidades de $\pm (5 \text{ a } 25)$ mm/ano.

O motivo da menor correlação entre ambas as tecnologias para o leste-oeste pode estar associado ao fato de os deslocamentos horizontais possuírem uma menor magnitude, dentro do nível de ruído da técnica, ± 5 mm/ano, como pode ser observado na análise da série temporal dos quatro prismas apresentados na Figura 4-15. Para os mesmos prismas analisados anteriormente, C-MT02, C-MT03, C-MT04 e C-MT05, os dados leste-oeste são apresentados na Figura 4-15, em conjunto com os dados EW do ponto do InSAR mais próximo de cada prisma. Os dados do pluviômetro da mina complementam a análise.

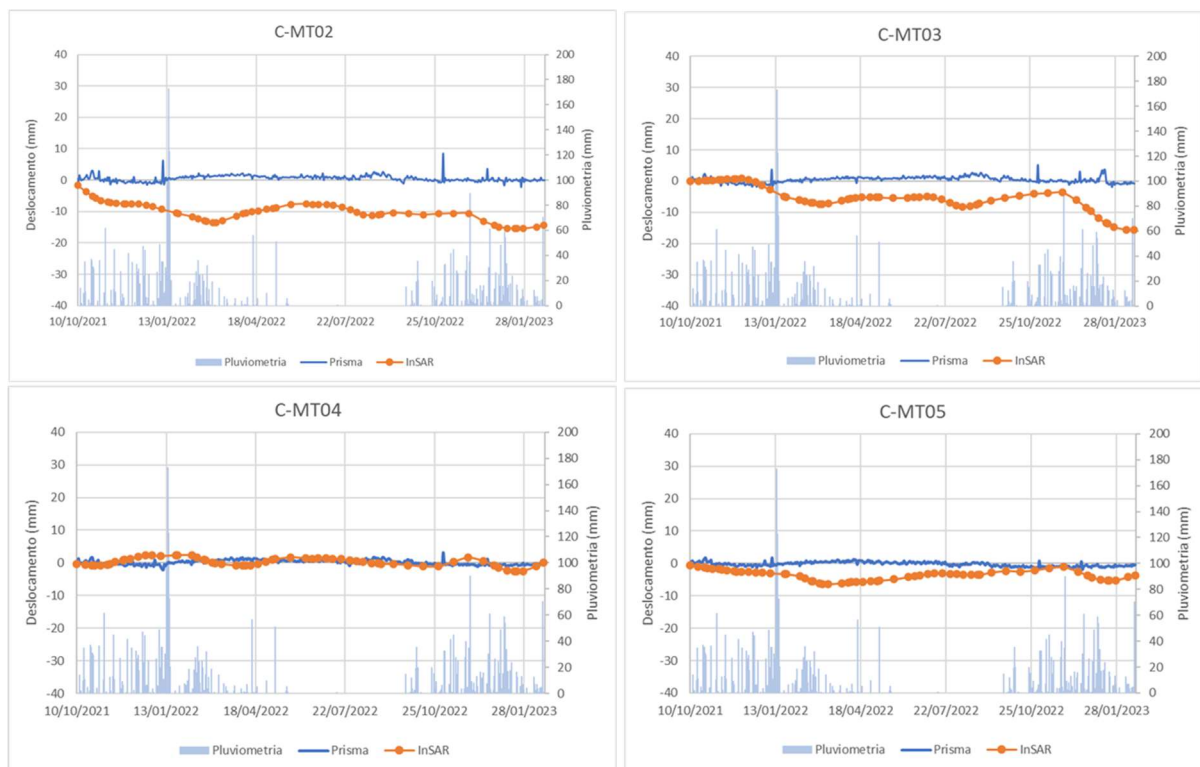


Figura 4-15 – Série temporal de deslocamento EW de quatro prismas exemplo selecionados no barramento e do ponto do InSAR localizado mais próximo de cada prisma – Barragem A. Os prismas C-MT04 e C-MT05 apresentam uma boa aproximação aos dados do InSAR, indicando valores oscilando em torno de zero milímetros para ambas as tecnologias, enquanto os prismas C-MT2 e C-MT3 apresentam dados mais correlatos com os dados do InSAR durante

o período de estiagem. Para o período de maior pluviometria, observa-se leve deslocamento em alguns pontos do InSAR.

A Figura 4-16 mostra os dados em milímetros dos valores de deslocamento vertical acumulado dos prismas de monitoramento e de pontos do InSAR localizados mais próximo desses prismas, em conjunto com a diferença de deslocamento observado entre ambas as tecnologias para a Barragem A. Os dados dos prismas estão apresentados em cor vinho e dos pontos do InSAR em cor azul, a diferença entre ambos é representada pela cor verde.

Reforça-se que para o barramento, os pontos do InSAR selecionados para análise se encontram entre 2 e 13 m dos prismas, dependendo de cada instrumento, uma curta distância considerando a resolução espacial de 10 m x 10 m dos dados do InSAR. Porém, para os prismas da praia de rejeito, foi necessário um maior raio de análise para a seleção desses pontos devido à baixa recuperação de pontos, sendo assim, os pontos do InSAR mais próximos dos prismas se encontram entre 5 e 57 m, o que pode ter influenciado na comparação dos dados.

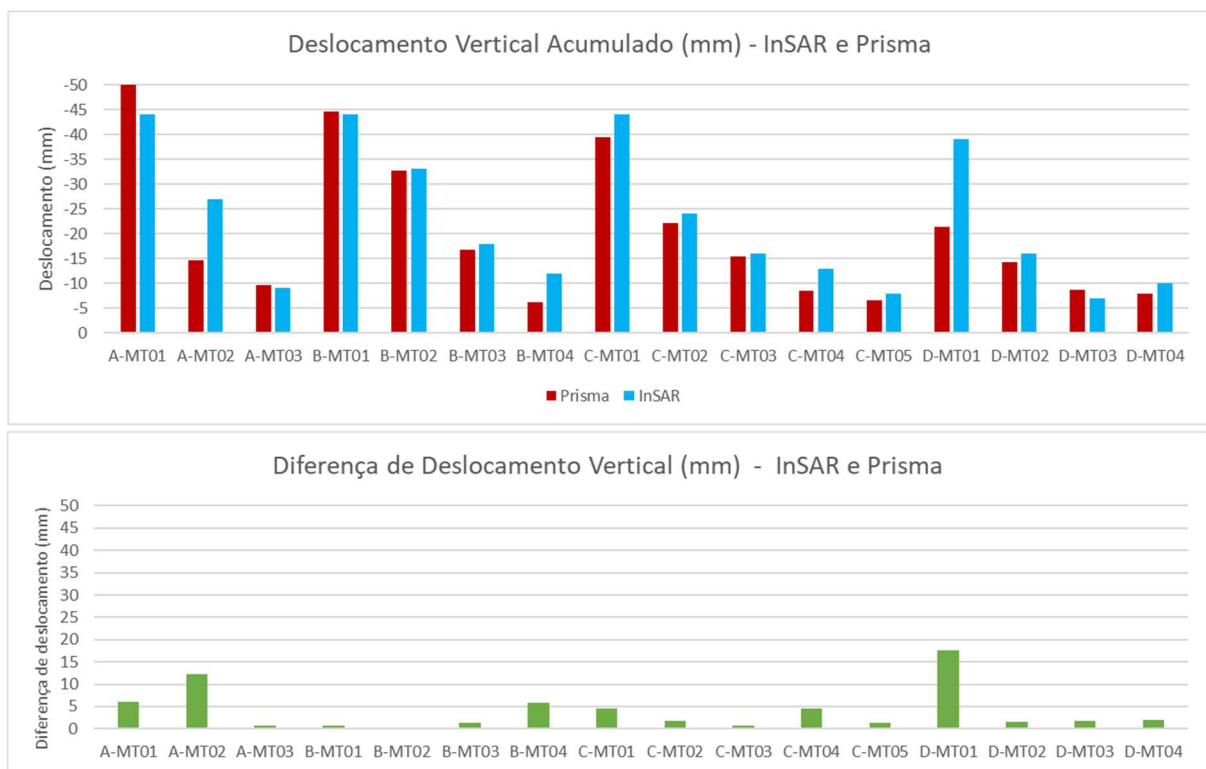


Figura 4-16 – Diferença de deslocamento Vertical Acumulado – InSAR e prismas de monitoramento da Barragem A.

Pode-se observar alta similaridade dos dados verticais entre as duas tecnologias, sendo que 75% dos dados apresentam diferença máxima de 5 mm, 12,5% diferença entre 5 mm e 10 mm, e

12,5% diferença maior que 10 mm. A máxima diferença encontrada entre os deslocamentos verticais é de 18 mm.

Da mesma forma, a Figura 4-17 apresenta, os dados em milímetros dos valores de deslocamento leste-oeste acumulado dos prismas de monitoramento e dos mesmos pontos do InSAR, localizados próximo desses prismas, em conjunto com a diferença de deslocamento observado entre ambas as tecnologias.

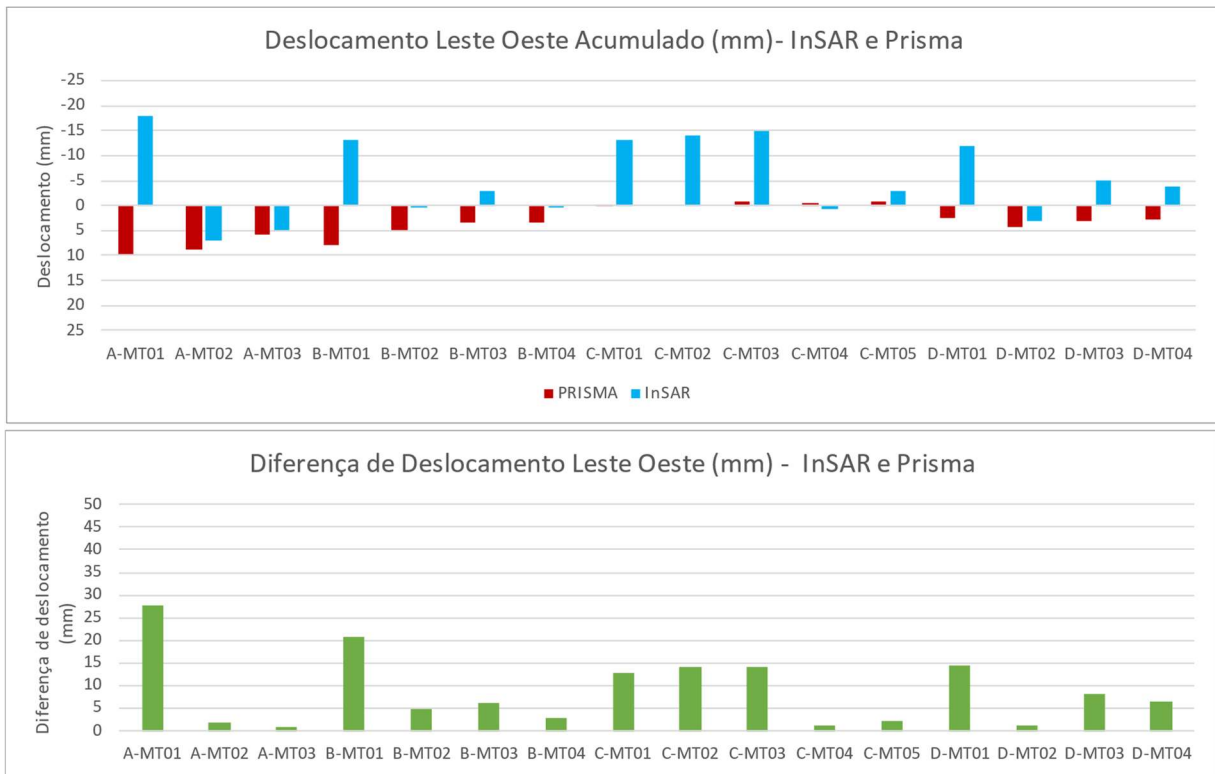


Figura 4-17 – Diferença de deslocamento Leste-oeste Acumulado – InSAR e prismas de monitoramento da Barragem A.

Para os dados leste-oeste, a similaridade encontrada é significativamente menor que para os dados verticais. 43,75% dos dados analisados para ambas as tecnologias apresentam diferença máxima de 5 mm, 18,75% diferença entre 5 mm e 10 mm, e 37,5% diferença maior que 10 mm. A máxima diferença encontrada entre os deslocamentos leste-oeste é de 28 mm.

Importante mencionar que 62,5% dos dados leste-oeste oscilam entre ± 5 mm/ano, valores dentro da precisão e do nível de ruído da técnica InSAR. Além disso, alguns dos prismas que apresentam maiores diferenças são os prismas localizados na praia de rejeito, em que foi necessário um maior raio de análise para a seleção dos pontos do InSAR utilizados, devido à baixa recuperação de pontos nessa região.

Pontua-se também que a resolução espacial dos dados do InSAR comparada com a dispersão espacial dos prismas é diferente, sendo que o prisma realiza uma medição pontual, específica do local, enquanto o dado do InSAR representa um pixel de 100 m² para os dados leste-oeste e vertical, o que pode influenciar na comparação de magnitude dos dados de deslocamento entre as tecnologias.

Com o objetivo de apresentar a aplicação da técnica em uma barragem com a crista orientada na direção norte-sul, ou seja, deslocamentos leste-oeste correspondentes a deslocamentos na direção montante-jusante da barragem (ou vice-versa), foi analisado um segundo estudo de caso.

Para a Barragem B, foram comparados os dados de deslocamentos verticais e leste-oeste encontrados para os prismas e os dados do InSAR da barragem. A Figura 4-18 apresenta o mapa da estrutura com os dados de velocidade de deslocamento vertical e EW anual, no período entre outubro 2021 e fevereiro 2023.

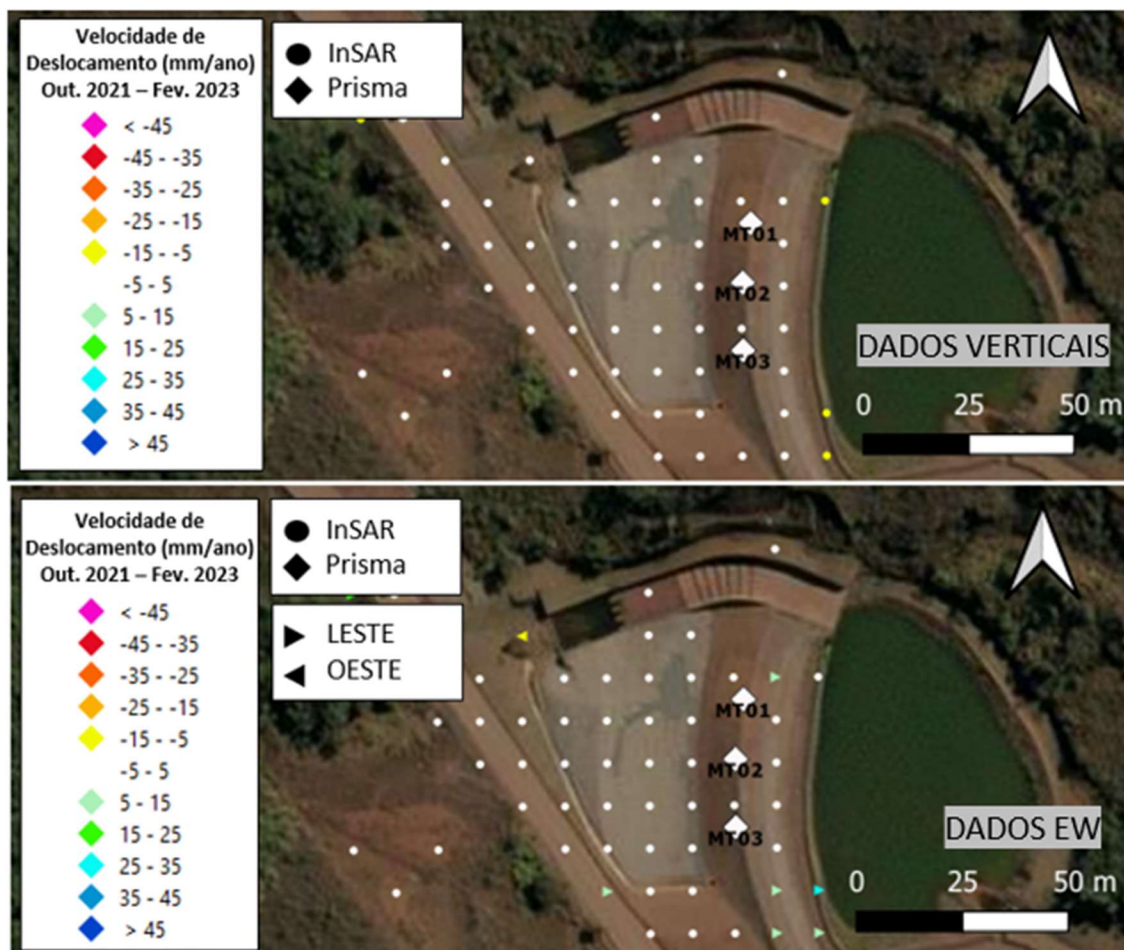


Figura 4-18 – Velocidade de deslocamento vertical e EW (mm/ano) da Barragem B – InSAR e prismas de monitoramento.

Observa-se uma boa concordância dos dados, os prismas e os pontos do InSAR localizados próximos apresentam cores de legenda semelhantes de velocidade de deslocamento anual. Os prismas apresentam valores de velocidade de deslocamento em torno de ± 5 mm/ano, enquanto os pontos do InSAR indicam majoritariamente valores semelhantes, representados por pontos brancos.

A Figura 4-19 e a Figura 4-20 apresentam, respectivamente, a análise da série temporal vertical e EW, para o mesmo período dos prismas da Barragem B (MT01, MT02 e MT03), em conjunto com o ponto do InSAR mais próximo desse instrumento, com o objetivo de comparar tendências e magnitudes observadas por ambas as tecnologias. Os dados do pluviômetro da mina complementam a análise.

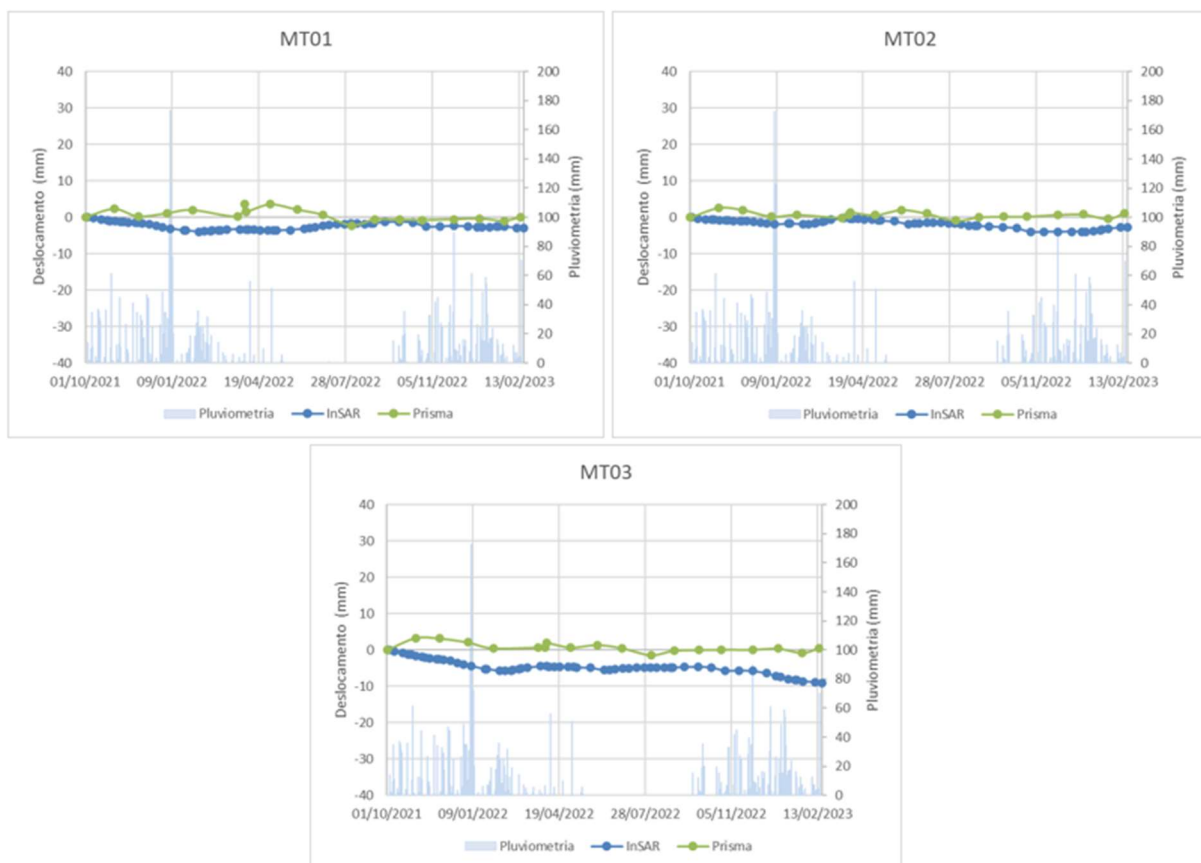


Figura 4-19 – Série temporal de deslocamento vertical de prismas e ponto do InSAR selecionado próximo - Barragem B.

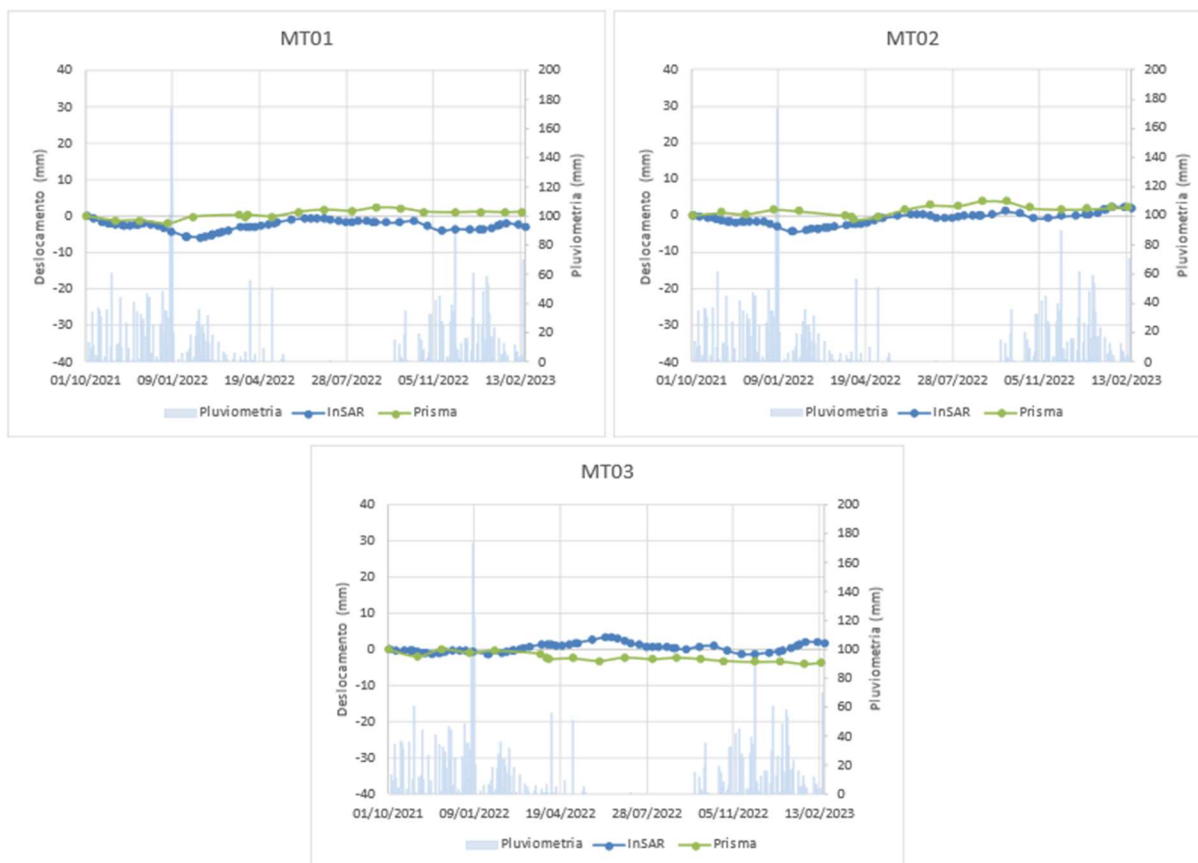


Figura 4-20 – Série temporal de deslocamento leste-oeste de prismas e ponto do InSAR selecionado próximo - Barragem B.

Os prismas apresentam uma boa aproximação aos dados do InSAR, com valores oscilando em torno de zero milímetros para ambas as tecnologias tanto nos dados verticais quanto nos dados leste-oeste. A diferença máxima observada entre ambas as medições é de 10 mm em um período de 1 ano e 5 meses de monitoramento.

4.3 VALIDAÇÃO E POTENCIAL DE USO DO MONITORAMENTO POR RADAR ORBITAL INSAR

O InSAR se mostrou uma técnica confiável, confirmando a confiabilidade e similaridade dos dados com os prismas, que pode ser aplicada no monitoramento de deslocamentos lentos e na possibilidade de identificação de anomalias e de possíveis causas dos principais modos de falha relacionados a deslocamentos em barragens de mineração.

Como mencionado na revisão bibliográfica, para estruturas classificadas com DPA alto, o empreendedor é obrigado a manter um sistema de monitoramento automatizado de instrumentação, com acompanhamento em tempo real e integral. Além disso, estruturas

classificadas como Nível de Emergência 3, o empreendedor é obrigado a evacuar a ZAS (ANM, 2023). Algumas mineradoras também realizam essa evacuação preventiva da ZAS em Nível de Emergência 2 (VALE SA, 2023). Segundo a ANM (2023), existem no Brasil oito estruturas em NE2 e NE3, sendo assim, uma técnica de análise de dado não invasiva se torna muito importante. O InSAR pode contribuir para a obtenção de dados de deslocamento, sem a necessidade de ação em campo para obtenção de medições ou realização de manutenções em equipamentos, diminuindo riscos.

Para o atendimento à PNSB, as mineradoras, devem emitir, quinzenalmente, o EC dessas estruturas sob sua gestão, incluindo quesitos como possíveis deformações e recalques e deterioração dos taludes e paramentos (ANM, 2023). Ou seja, as barragens devem passar por essa avaliação com uma periodicidade mínima quinzenal. Sendo assim, a técnica InSAR pode ser aplicada na análise estratégica de deslocamento de grande parte das estruturas, apresentando uma alta abrangência de análise, possibilitando a realização de análises detalhadas de deslocamentos lentos, considerando as linhas de visada e decomposições vetoriais da técnica. É importante ressaltar que a redundância no monitoramento é sempre recomendável. Considerando as limitações da técnica, como o tempo de revisita do satélite e processamento dos dados, resolução espacial, possíveis distorções geométricas, a linha de visada do satélite e decomposições vetoriais, é importante a utilização de outras tecnologias para confirmar e complementar os dados de deslocamento analisados, como prismas de monitoramento.

Com relação às decomposições vetoriais, a orientação da crista da estrutura influencia no significado do deslocamento apresentado pelo EW do InSAR. Em cristas orientadas aproximadamente norte-sul, deslocamentos do InSAR na decomposição EW indicam deslocamentos na direção montante-jusante da barragem (ou vice versa), enquanto para uma barragem que possui a crista orientada aproximadamente EW, deslocamentos do InSAR na decomposição EW indicam deslocamentos na direção ombreira-ombreira.

Visando um maior entendimento da aplicabilidade do dado do InSAR para diferentes situações, é apresentado na Figura 4-21 e na Figura 4-22 uma análise de orientação da crista de 42 barragens, no estado de Minas Gerais. As orientações foram divididas em três grupos, cada estrutura analisada esta representada na imagem por linhas em diferentes cores. Barragens com crista orientada entre $-22,5^{\circ}$ e $22,5^{\circ}$ (preferencialmente norte-sul) foram classificadas como grupo A, barragens com crista orientada entre $22,5^{\circ}$ e $67,5^{\circ}$ (preferencialmente nordeste-sudoeste) ou $112,5^{\circ}$ e $157,5^{\circ}$ (preferencialmente noroeste-sudeste) foram classificadas como

grupo B e barragens com crista orientada entre $67,5^\circ$ e $112,5^\circ$ (preferencialmente leste-oeste) foram classificadas como grupo C.

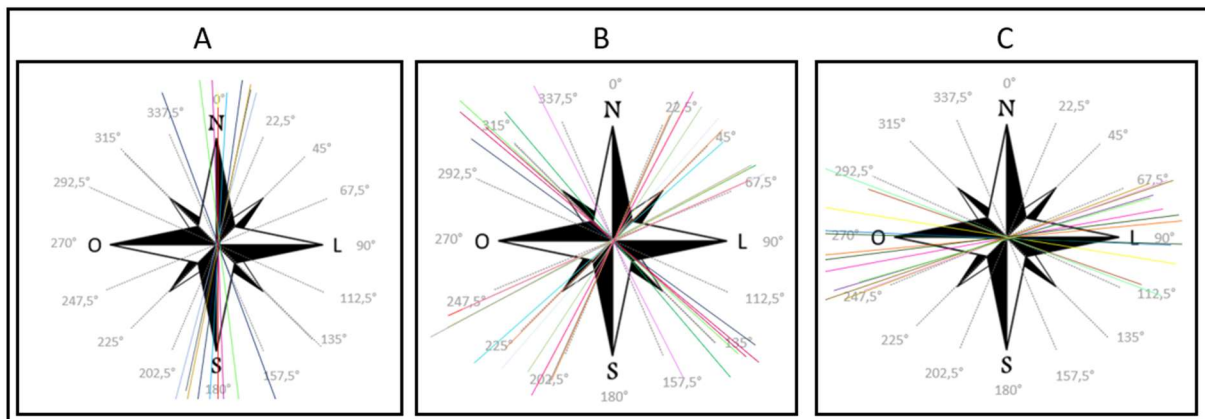


Figura 4-21 – Orientação da crista das 42 barragens, representadas por diferentes cores e dividida em 3 grupos.

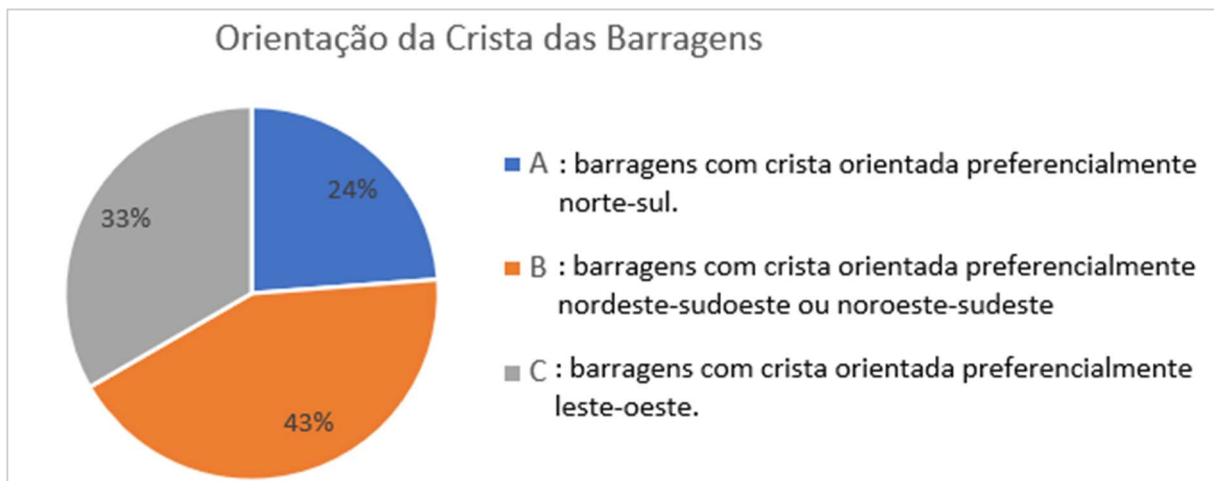


Figura 4-22 – Classificação das 42 barragens em três grupos de acordo com a orientação da crista.

De modo geral, as estruturas analisadas apresentam diferentes orientações. Considerando a classificação, pode-se observar que 33% das estruturas apresentam orientação da crista preferencialmente EW, ou seja, os deslocamentos do InSAR observados na decomposição EW representam em grande parte deslocamentos na direção ombreira-ombreira. Por outro lado, para 24% das barragens, a orientação da crista está entre $-22,5^\circ$ e $22,5^\circ$, preferencialmente norte-sul, sendo assim, deslocamentos do InSAR na decomposição EW representam em grande parte deslocamentos na direção montante-jusante da barragem (ou vice-versa).

Por fim, para 43% das estruturas analisadas, orientadas preferencialmente nordeste-sudoeste ou noroeste-sudeste, deslocamentos do InSAR na decomposição EW podem significar em partes

deslocamentos na direção ombreira ombreira e em partes deslocamentos na direção montante jusante (ou vice-versa).

De forma geral, a técnica InSAR apresenta um alto potencial de utilização no ambiente de mineração, podendo contribuir para o monitoramento de deslocamentos de diversas estruturas. Ressalta-se a importância do entedimento dos dados e dos fatores associados na análise, como a orientação da crista, para uma melhor utilização da técnica e compreensão dos resultados.

5 CONCLUSÕES

A técnica InSAR permite a detecção de deslocamentos lentos do terreno na direção da linha de visada do satélite medidos com precisão de milímetros por ano. É uma técnica não invasiva, sem a necessidade de instalação de qualquer equipamento de campo, monitorando grandes áreas em curto período e a baixo custo. Esta técnica possibilita a identificação de deslocamentos superficiais de uma estrutura geotécnica que podem ser precursores de instabilidade e outras anomalias.

Como qualquer tecnologia, o InSAR possui vantagens e desvantagens. É possível usar os dados de InSAR para detectar movimentos lentos e acelerações e para excluir a presença de deslocamentos anormais ou inesperadas na área monitorada. Porém, a técnica não pode ser aplicada para a detecção de movimentos rápidos, devido a ambiguidade de fase e consequente ausência de dados. Além disso, distorções geométricas podem ocorrer, como sombreamento e inversão de relevo, não fornecendo pontos de medição. A linha de visada e o tempo de revisita do satélite, a impossibilidade de detecção de movimentos puramente norte-sul, a pouca ou nenhuma recuperação de pontos em presença de vegetação densa ou arbórea (banda X) e umidade são outros pontos limitantes da técnica.

De modo geral, o monitoramento histórico de deslocamento via InSAR de uma barragem pode ser analisado para acompanhar a performance da estrutura, indicar regiões de maiores deslocamentos, possíveis modificações de velocidades e anomalias, onde pode ser necessário maiores estudos, inspeções visuais ou instalação de instrumentação de monitoramento crítico.

No que tange a aplicabilidade dos dados da técnica InSAR, com base nos itens estudados na revisão bibliográfica e o estudo desenvolvido, o monitoramento via InSAR pode ser importante na identificação de algumas causas de potenciais modos de falha e possíveis anomalias de estrutura geotécnica, ou em locais propícios ao desenvolvimento de anomalias. De acordo com os resultados obtidos, é possível classificar o monitoramento via InSAR como desejável ou complementar para identificação prévia de causas ou locais suscetíveis a ocorrência de causas dos modos de falha de galgamento, erosão interna e instabilização.

Apesar do monitoramento de deslocamentos não ser considerado um monitoramento direto para alguns dos principais modos de falha de uma estrutura geotécnica, ao analisar possíveis causas que poderiam levar à essas falhas, o monitoramento de deslocamentos é indispensável e possibilita a identificação prévia de diversas anomalias. O modo de falha de galgamento, por exemplo, não elenca o monitoramento de deslocamentos como monitoramento direto (IBRAM,

2019), mas uma perda de borda livre ou instabilidade dos taludes no entorno do reservatório ou extravasor, pode ser precursor desse modo de falha e pode ser monitorado pelo InSAR, considerando algumas limitações destacadas na pesquisa.

No caso de identificações de movimentos lentos e em maiores extensões ou anomalias que podem ter origem desses movimentos, como trincas de recalques diferenciais, o monitoramento via InSAR é considerado desejável e importante. Em outros casos, o monitoramento pode ser considerado complementar, uma vez que pode apoiar na identificação de anomalias, porém, outras tecnologias são necessárias para elaboração de diagnósticos consistentes, como o caso de desabamentos e colapsos.

Porém, é importante reforçar que possíveis causas de modos de falha devem ser analisadas no cenário global em que a estrutura está inserida. Por exemplo, deformações excessivas com redução de borda livre só podem ser consideradas uma possível causa de modo de falha, se o nível de água no reservatório for suficiente para ocasionar um possível transbordamento. Sendo assim, o InSAR, em conjunto com inspeções em campo, também pode ser muito importante e estratégico para desencadear planos de ação relacionados a instalação de equipamento de monitoramento crítico, manutenções corretivas ou possíveis obras de ajuste de projeto ou retaludamento. No caso de recalque da crista com consequente redução de borda livre, por exemplo, essa identificação pode levar a criação de um plano de manutenção corretiva, visando ajuste de projeto e adequação da altura da crista da estrutura. Reforça-se também que a técnica InSAR mede deslocamentos, sendo muito importante o especialista analisar os dados avaliando o cenário global de todas as possíveis causas e consequências de deslocamentos que estejam ocorrendo nas estruturas geotécnicas, uma vez que pode estar associado a diferentes anomalias e modos de falha.

No que tange a confiabilidade das informações obtidas por essa técnica, a qualidade dos dados recuperado pode ser impactada por diversos motivos. As variações no tempo de revisita do satélite para adquirir os dados observados no estudo, por exemplo, pode reduzir significativamente a coerência temporal dos dados, o que pode diminuir a recuperação de pontos e aumentar as chances de ocorrência de eventos de ambiguidade de fases. Além disso, é essencial conhecer o nível de ruído dos dados para entender quanto do deslocamento visto pode ser considerado um comportamento real. O estudo mostrou que os pontos apresentam um nível de ruído em torno de ± 5 mm/ano, valor próximo a precisão da técnica. Não houve influência substancial da sazonalidade na faixa de variação da amplitude dos dados de deslocamento.

O estudo de comparação de dados de monitoramento via InSAR e Estação Total Robótica apresentou alta concordância para ambas as estruturas, principalmente na decomposição vertical. Considerando a Barragem A, 75% dos dados verticais analisados apresentaram diferença máxima de 5 mm entre o prisma e o ponto do InSAR localizado próximo, o que comprova qualidade e confiabilidade desses dados. Para os dados leste-oeste, a similaridade encontrada foi menor, porém, 62,5% desses dados oscilam entre ± 5 mm/ano, valores dentro da precisão da técnica InSAR e do nível de ruído encontrado no estudo, além de alguns dos prismas que apresentaram menor similaridade dos dados quando comparado ao ponto do InSAR são os prismas localizados na praia de rejeito, em que foi necessário a utilização de um maior raio de análise para a seleção dos pontos do InSAR comparados, devido à baixa recuperação de pontos nessa região.

Ressalta-se a importância do entendimento dos dados do InSAR e dos fatores associados na análise, como a relação entre os dados da decomposição vetorial EW e a orientação da crista das estruturas, para uma melhor utilização da técnica e compreensão dos resultados. De modo geral, as 42 estruturas analisadas apresentam diferentes orientações, o que faz com que o dado EW do InSAR signifique deslocamentos em diferentes direções para cada uma dessas.

Sendo assim, o InSAR se mostrou uma técnica confiável e validada, que pode ser aplicada no monitoramento de deslocamentos lentos, de longo prazo e na identificação de diversas anomalias, considerando as limitações da técnica e sendo necessário o correto entendimento dos dados em que se está trabalhando. Uma vez que é capaz de monitorar áreas inacessíveis ou de difícil acesso, dispensa o problema de roubos ou vandalismo, bem como a necessidade de ação em campo para obtenção de medições ou realização de manutenções em equipamentos, e pode ser usado para monitoramento de deslocamentos em condições críticas de visibilidade. Ademais, a técnica também tem se mostrado eficiente em apontar locais adequados para instalação de monitoramentos complementares como prismas e radares terrestres, além de atuar como redundância de monitoramento de deslocamentos.

5.1 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se a realização de um estudo de caso dos dados do InSAR com a instalação e monitoramento de *Corner reflectors* e prismas de monitoramento por Estação Total Robótica associados, a fim de realizar uma comparação pontual dos deslocamentos apresentados por

ambas as tecnologias e analisar a confiabilidade de deslocamentos apresentados por *Corner reflectors* com o monitoramento via InSAR.

Sugere-se avaliar a comparação de dados do InSAR com outras tecnologias de deslocamento, como os dados de *Slow Movement (Subsampling)* entregue pela tecnologia de Radar Terrestre. Essa técnica esta sendo aperfeiçoada cada vez mais e a comparação desses dados poderia ser um estudo interessante.

Sugere-se estudos com satélites que operem em outras bandas, como C ou L, para um maior entendimento da entrega dos dados em áreas com maiores vegetações, como o caso de encostas naturais. Sugere-se também replicar o estudo de aplicabilidade e comparação de dados considerando essas diferentes bandas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALASKA SATELLITE FACILITY (2023), How to Create an RGB Composite from Multi-Temporal Sentinel-1 Data, Alaska Satellite Facility. <<https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/create-an-rgb-composite-from-multi-temporal-sentinel-1-data/>>.
- ANA (2016). Agência Nacional do Águas (Brasil). Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem. Brasília – DF, 218 p.
- ADAMO, N., AL-ANSARI, N., SISSAKIAN, V., LAUE, J., & KNUTSSON, S. (2020). Dam safety and overtopping. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10(6): 41-78.
- ANM (2023). Agência Nacional de Mineração, Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração (SIGBM), Estatística. <<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>>.
- ANM (2023). Agência Nacional de Mineração (Brasil). Resolução ANM nº 130 de 24 de fevereiro de 2023. Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências.
- CARLÀ, T.; INTRIERI, E.; RASPINI, F.; BARDI, F.; FARINA P; FERRETTI, A.; COLOMBO, D; NOVALI, F.; CASAGLI, N. (2019) Author Correction: Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Scientific Reports*. 2019; 9 (1): 18773.
- CLARKSON, L., WILLIAMS, D. (2021a) An Overview of Conventional Tailings Dam Geotechnical Failure Mechanisms. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38 (3): 1305–1328.
- CLARKSON, L.; WILLIAMS, D; REDCLIFFE, P., VAN DER WAL, F (2021b). Trends in real-time instrumentation and monitoring techniques for tailings dams. *Proceedings of Mine Waste and Tailings Conference 2021, Brisbane, Australia*.
- CLEMENTE, B., FERREIRA P., GONÇALVES D. (2022). Detecção de movimentação do marco da estação total robótica influenciando dados de monitoramento. VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), ABMS, Porto de Galinhas, Brasil. 6: 173-179.
- COPERNICUS (2023a), User Guides - Sentinel-1 SAR - Revisit and Coverage. The European Space Agency. <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/revisit-and-coverage>>
- COPERNICUS (2023b), User Guides - SENTINEL-2 MISSION GUIDE. The European Space Agency. <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>>
- FELL, R., MACGREGOR, P., STAPLEDON, D., BELL, G. & FOSTER, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams*, 2nd eds, CRC Press/Balkema, The Netherlands. 1382 p.
- HAWLEY, M.; MARISSETT, S.; BEALE, G.; STACEY P. (2009). Performance Assessment and Monitoring. Guidelines for Open Pit Slope Design. Ed. Read J., Stacey P. Csiro Publishing, p. 327-371.

- IBGE (2008). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Padronização de Marcos Geodésicos. 27 p.
- IBRAM (2019). Instituto Brasileiro de Mineração. Guia de Boas Práticas – Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos, 1ed. Brasília, 144 p.
- INTRIERI, E.; RASPINI, F.; FUMAGALLI, A.; PING LU; CONDE, S.; FARINA, P.; ALLIEVI, J.; FERRETTI, A.; CASAGLI, N. (2018). The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. *Landslides*. 15 (1): 123–133.
- LEICA GEOSYSTEM (2023). TM50 Monitoring Station. <<https://leica-geosystems.com/pt-br/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-nova-tm50>>.
- LEICA GEOSYSTEMS (2010). Leica GeoMoS v5.1, Online Help. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland.
- LEWIS, A. J.; HENDERSON, F.M.; HOLCOMB, D. W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. Principles & applications of imaging Radar, Manual of Remote Sensing. New York, John Wiley & Sons, p. 131-180.
- MAGALHÃES, G., BARBOSA, J., JULIANO, F., RODRIGUES, A., RAMOS, R., ASSIS, L. (2023). Quality Assurance on Tailing Facilities Monitoring Systems Commissioning. Tailings 2023, 9th International Conference on Tailings Management, Gecamin, Santiago, Chile, 4: 567 – 575.
- MINAS GERAIS (2021). Decreto Estadual 48.140/2021, regulamenta a Política Estadual de Segurança de Barragens, prevista na Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens, estabelece medidas para aplicação do art. 29 da Lei nº 21.972, de 21 de janeiro de 2016, e dá outras providências.
- PARADELLA, W. R., MURA, J. C., & GAMA, F. F. (2021). Monitoramento DInSAR para mineração e geotecnia: a tecnologia DInSAR orbital na mineração e geotecnia: monitoramento do espaço deformações na superfície. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 1. ed., 160 p.
- PIMENTEL, K; VASCONCELOS, I.; MAPA, B.; LAGE, D.; COSTA, F.; LISBOA, P.; COSTA, T.; FARINA, P. (2021). Towards the Development of an Effective Monitoring Program of Tailings Dam: The Vale Experience. Tailings 2021, 7th International Conference on Tailings Management, Gecamin, Santiago, Chile.
- SHARON, R.; EBERHARDT, E. (2020). Guidelines for Slope Performance Monitoring, CSIRO Publishing, CRC Press/Balkema, 331 p.
- SILVEIRA, J. (2003). Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 317 p.
- TAVARES, A. P. M. (2020). Metodologia de gestão de risco de barragens de rejeitos de minério com vistas à fiscalização. Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 229 p.

THOMAS, A., EDWARDS, S.J., ENGELS, J, MCCORMACK, H., HOPKINS, V & HOLLEY, R. (2019). Earth observation data and satellite InSAR for the remote monitoring of tailings storage facilities: a case study of Cadia Mine, Australia. AJC Paterson, AB Fourie & D Reid (eds), Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia. p. 183-195.

TRE-ALTAMIRA (2023a). InSAR. <<https://site.tre-altamira.com/InSAR/>>.

TRE-ALTAMIRA (2023b). InSAR Corner Reflector. <<https://site.tre-altamira.com/insar-solutions/insar-corner-reflectors/>>.

WYLLIE, D.C. (2018). Rock Slope Engineering: Civil Applications. Fifth Edition, Taylor & Francis Group, 568 p.

VALE SA (2023). Barragens. <<https://www.vale.com/pt/barragem>>.