

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SÉRGIO DA CONCEIÇÃO ALVES

ANÁLISE DE SUBSIDÊNCIA EM ÁREAS URBANAS: UM ESTUDO ENVOLVENDO  
A INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL DE IMAGENS SAR EM UMA ABORDAGEM  
MULTITEMPORAL

CURITIBA

2023

SÉRGIO DA CONCEIÇÃO ALVES

ANÁLISE DE SUBSIDÊNCIA EM ÁREAS URBANAS: UM ESTUDO ENVOLVENDO  
A INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL DE IMAGENS SAR EM UMA ABORDAGEM  
MULTITEMPORAL

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas no curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná – UFPR.

Comitê de Orientação: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regiane Dalazoana, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cláudia Pereira Krueger e Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Laurent Polidori.

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Alves, Sérgio da Conceição

Análise de subsidência em áreas urbanas: um estudo envolvendo a interferometria diferencial de imagens SAR em uma abordagem multitemporal / Sérgio da Conceição Alves. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Regiane Dalazoana

Coorientadores: Cláudia Pereira Krueger; Laurent Polidori

1. Subsidências (movimentos da Terra) – Maceió (AL). 2. Subsidências (movimentos da Terra) – Curitiba (PR). 3. Interferometria. 4. Radar de abertura sintética. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Dalazoana, Regiane. IV. Krueger, Cláudia Pereira. V. Polidori, Laurent. VI. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS  
GEODÉSICAS - 40001016002P6

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **SERGIO DA CONCEIÇÃO ALVES** intitulada: **ANÁLISE DE SUBSIDÊNCIA EM ÁREAS URBANAS: UM ESTUDO ENVOLVENDO A INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL DE IMAGENS SAR EM UMA ABORDAGEM MULTITEMPORAL**, sob orientação da Profa. Dra. REGIANE DALAZOANA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Agosto de 2023.

Assinatura Eletrônica  
15/08/2023 13:12:34.0  
REGIANE DALAZOANA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
15/08/2023 10:24:59.0  
MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE EST.PAULISTA JÚLIO DE  
MESQUITA FILHO/PR.PRUDENT)

Assinatura Eletrônica  
16/08/2023 18:25:57.0  
JORGE ANTONIO SILVA CENTENO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
16/08/2023 19:54:15.0  
SILVIO JACKS DOS ANJOS GARNES  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO)

*“é muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”*

Theodore Roosevelt (1924)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Marluce; ao meu pai, Antônio; às minhas avós, Dona Valda e Dona Maria; e às minhas irmãs, Sueli, Cimária e Cimone, por me apoiarem em todos os momentos.

Agradeço também ao meu tio-avô Walter, que se encontra com os anjos, pelo apoio em todas as etapas da minha vida. A ele eu dedico essa vitória.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), agradeço pelo compromisso com políticas públicas e pela promoção da igualdade de oportunidades, que têm fornecido um suporte inestimável para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Levo comigo as melhores lembranças dessa instituição.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), expresso minha gratidão pela oportunidade concedida e pela disponibilização de instalações e equipamentos indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

Aos meus orientadores, agradeço pela amizade, incentivo, paciência e confiança em mim depositada. Vocês sempre acreditaram no meu potencial.

À CAPES, sou grato pelo apoio financeiro fornecido, que foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos que fiz no PPGCG como a Hassuda, Pilapanta e Euriques, expresso minha gratidão por seus conselhos, paciência e conversas enriquecedoras. Sua presença constante tornou minha jornada mais leve.

Meus sinceros reconhecimentos ao meu amigo Gomes pelas dificuldades que enfrentamos durante todo esse trajeto. Fomos guerreiros!

Agradeço ao meu caro amigo Naim, às vezes fastidioso, mas um grande amigo.

Também agradeço a mim mesmo pelo esforço, pela determinação em vencer e por acreditar em meu potencial, mesmo diante dos desafios enfrentados ao longo desses últimos anos, desde a pandemia até a descrença na ciência.

Por fim, e mais importante, agradeço a Deus por ter sido meu sustento nos momentos mais difíceis, por me dar forças e coragem para alcançar meus objetivos.

## RESUMO

Para compreender e monitorar adequadamente os riscos decorrentes de processos deformantes, como a subsidência, é fundamental identificá-los e avaliar sua magnitude de forma precisa. O uso difundido do GNSS permite uma avaliação geral dessas instabilidades por meio de posições absolutas ou medições contínuas dos pontos dentro das áreas afetadas. Além disso, a abordagem interferométrica de abordagem multi-temporal (MT-InSAR), como a técnica PSInSAR, possibilita o monitoramento e a detecção de pequenas variações no terreno causadas por movimentos da superfície, como deslizamentos de terra ou subsidência. Neste trabalho, os resultados do processamento interferométrico empregando a técnica PSInSAR foram analisados. Inicialmente, um estudo foi realizado em uma área com histórico de subsidência no bairro Pinheiro, em Maceió, Brasil, para verificar o processo de subsidência após um terremoto em 2018. Foram utilizados pacotes de processamento gratuito, como a integração SNAP-StaMPS. Em um segundo estudo, complementamos os resultados de uma análise de subsidência por meio de observações GPS realizadas no bairro Guabirota, em Curitiba (PR). O processamento PSInSAR foi aplicado a 77 imagens SAR da missão Sentinel-1A, adquiridas no modo descendente no período de 2016 a 2019. Os resultados obtidos no primeiro teste permitiram a detecção e mensuração da taxa de deslocamento na área estudada. No bairro Pinheiro, os processamentos foram capazes de identificar a subsidência de forma precisa durante e após o terremoto. A velocidade média de subsidência na direção *Line-of-Sight* foi classificada como lenta, enquanto nas áreas circundantes foi classificada como extremamente lenta. No bairro Guabirota, a subsidência detectada apresentou uma velocidade extremamente lenta, possivelmente devido às características geológicas do terreno ou a um deslocamento sazonal da região. Em suma, o uso da técnica PSInSAR revelou-se eficaz na detecção e monitoramento da subsidência em ambas as áreas de estudo. Os resultados obtidos contribuem para o entendimento dos processos deformantes e fornecem informações valiosas para a avaliação e o gerenciamento dos riscos associados. Com a continuidade desse tipo de pesquisa, será possível aprimorar ainda mais as técnicas de monitoramento e compreender melhor os fenômenos que afetam o terreno, possibilitando uma tomada de decisão mais informada e uma mitigação eficaz dos riscos.

**Palavras-chave:** PSInSAR, SNAP-StaMPS, Interferometria, Sentinel-1A.

## ABSTRACT

To properly understand and monitor the risks arising from deformative processes such as subsidence, it is essential to identify them and assess their magnitude accurately. The widespread use of GNSS allows for a general evaluation of these instabilities through absolute positioning or continuous measurements of points within the affected areas. Additionally, the multi-temporal interferometric approaches (MT-InSAR), such as the PSInSAR technique, enable monitoring and detection of small variations in the terrain caused by surface movements, such as landslides or subsidence. In this study, the results of interferometric processing using the PSInSAR technique were analyzed. Initially, a study was conducted in an area with a history of subsidence in the Pinheiro neighborhood, Maceió, Brazil, to investigate the subsidence process following an earthquake in 2018. Free processing packages like SNAP-StaMPS were used. In a second study, we complemented the results of a subsidence analysis with GPS observations conducted in the Guabirota neighborhood, Curitiba (PR). The PSInSAR processing was applied to 77 SAR images from the Sentinel-1A mission, acquired in descending mode from 2016 to 2019. The obtained results allowed for the detection and measurement of the subsidence rate in the studied area. In the Pinheiro neighborhood, the processing was able to accurately identify subsidence during and after the earthquake. The average subsidence velocity in the Line-of-Sight direction was classified as slow, while in the surrounding areas, it was classified as extremely slow. In the Guabirota neighborhood, the detected subsidence exhibited an extremely slow velocity, possibly due to the geological characteristics of the terrain or seasonal displacement in the region. In summary, the use of the PSInSAR technique proved effective in detecting and monitoring subsidence in both study areas. The obtained results contribute to the understanding of deformative processes and provide valuable information for risk assessment and management. With the continuation of this type of research, it will be possible to further improve monitoring techniques and gain a better understanding of the phenomena affecting the terrain, enabling informed decision-making and effective risk mitigation.

**Keywords:** PSInSAR, SNAP-StaMPS, Interferometry, Sentinel-1A.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EXEMPLO DE UM FASOR.....	40
FIGURA 2 - CAPACIDADE DE PENETRAÇÃO DO SINAL CONFORME $\sigma^0 \lambda$ .....	41
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA AQUISIÇÃO DE IMAGENS SLC-SAR.....	46
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES GNSS DA RBMC NO BRASIL.....	57
FIGURA 5 - ALGUNS TIPOS DE MOVIMENTO DE MASSA.....	58
FIGURA 6 – RACHADURAS EM CONSTRUÇÕES NO BAIRRO PINHEIRO - MACEIÓ .....	63
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DAS REGIONAIS E AQUÍFERO GUABIROTUBA DA CIDADE DE CURITIBA .....	64
FIGURA 8 - FOLHA GEOLÓGICA DE CURITIBA.....	65
FIGURA 9 - REDE GPS MATERIALIZADA NO BAIRRO DO GUABIROTUBA (CURITIBA - PR).....	67
FIGURA 10 - EVIDÊNCIA DE PROCESSO DE SUBSIDÊNCIA NO BAIRRO DO GUABIROTUBA – CURITIBA. ....	67
FIGURA 11 - GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO DE UM SAR .....	70
FIGURA 12 - MODO DE AQUISIÇÃO DO SISTEMA SENTINEL -1. ....	71
FIGURA 13 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA INTEGRAÇÃO SNAP-STAMPS PARA O PROCESSAMENTO PSINSAR. ....	72
FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EMPREGADA .....	74
FIGURA 15 - FLUXOGRAMA DA ETAPA A: PROCESSAMENTO SOBRE O BAIRRO PINHEIRO - MACEIÓ .....	75
FIGURA 16 - LINHA BASE PERPENDICULAR ENTRE AS IMAGENS S E M - MACEIÓ .....	76
FIGURA 17 - FLUXOGRAMA DA ETAPA B: PROCESSAMENTO SOBRE O BAIRRO DO GUABIROTUBA - CURITIBA .....	78
FIGURA 18 - PROCESSAMENTO PSINSAR UTILIZANDO 77 IMAGENS SLC-SAR - CURITIBA .....	79
FIGURA 19 - LINHA BASE PERPENDICULAR ENTRE AS IMAGENS S E M (ANUAL DE 2016 A 2022) - CURITIBA.....	81
FIGURA 20 - COMPARAÇÃO DAS TAXAS DE DESLOCAMENTO E DESLOCAMENTOS RELATIVOS (GPS X PSINSAR™) .....	82

FIGURA 21 - REPRESENTAÇÃO DA PROJEÇÃO DA VELOCIDADE EM LOS.....	83
FIGURA 22 - INTERFEROGRAMAS DIFERENCIAIS DAS IMAGENS SLC-SAR DO PERÍODO DE 2017-2018 (SEM DESDOBRAMENTO DA FASE). .....	85
FIGURA 23 - INTERFEROGRAMAS DIFERENCIAIS DAS IMAGENS SLC-SAR DO PERÍODO DE 2021-2022 (SEM DESDOBRAMENTO DA FASE). .....	86
FIGURA 24 - INTERFEROGRAMAS DIFERENCIAIS DAS IMAGENS SLC-SAR DO PERÍODO DE 2017-2018 (FASE DESDOBRADA).....	88
FIGURA 25 - INTERFEROGRAMAS DIFERENCIAIS DAS IMAGENS SLC-SAR DO PERÍODO DE 2021-2022 (FASE DESDOBRADA).....	88
FIGURA 26 - MAPA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PS OBTIDOS NO PROCESSAMENTO 2017-2018. ....	89
FIGURA 27 - MAPA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PS OBTIDOS NO PROCESSAMENTO 2021-2022. ....	90
FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DOS PS OBTIDOS NO PROCESSAMENTO DE 2017-2018 E 2021-2022.....	91
FIGURA 29 - DISTRIBUIÇÃO DOS PS ENTORNO DO BAIRRO PINHEIRO.....	92
FIGURA 30 - SÉRIES TEMPORAIS DE PS-2017-2018 E PS-2021-2022. ....	94
FIGURA 31 - INTERFEROGRAMAS DIFERENCIAIS DAS IMAGENS SLC-SAR DO PERÍODO DE 2016-2022 (SEM DESDOBRAMENTO DA FASE). .....	95
FIGURA 32 - RUÍDOS DOS INTERFEROGRAMAS DO PROCESSAMENTO 2016-2022. ....	96
FIGURA 33 - INTERFEROGRAMAS DIFERENCIAIS DAS IMAGENS SLC-SAR DO PERÍODO DE 2016-2022 (COM A FASE DESDOBRADA). ....	96
FIGURA 34 - RESULTADO DO PROCESSAMENTO PSINSAR™ COM OS INTERFEROGRAMAS COM RUÍDOS ACIMA DE 70°. ....	97
FIGURA 35 - INTERFEROGRAMAS DIFERENCIAIS DAS IMAGENS SLC-SAR DO PERÍODO DE 2016-2022 (SEM DESDOBRAMENTO DA FASE). .....	98
FIGURA 36 - RUÍDOS DOS INTERFEROGRAMAS DO PROCESSAMENTO 2016-2022. ....	98
FIGURA 37 - INTERFEROGRAMAS DIFERENCIAIS DAS IMAGENS SLC-SAR DO PERÍODO DE 2016-2022 (COM A FASE DESDOBRADA). ....	99
FIGURA 38 - RESULTADO DO PROCESSAMENTO UTILIZANDO NOVAS IMAGENS SLC-SAR. ....	99

FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO DOS PS IDENTIFICADOS PELA TÉCNICA PSINSAR. .....	100
FIGURA 40 - RESULTADO DO PROCESSAMENTO DOS ANOS DE 2016 A 2022. .....	101
FIGURA 41 - SÉRIE TEMPORAL DOS PS PRÓXIMOS AO MARCO M012. ....	104
FIGURA 42 - SÉRIE TEMPORAL DOS PS E DA ESTAÇÃO RBMC-UFPR.....	105
FIGURA 43 - SÉRIE TEMPORAL DOS PS E DA ESTAÇÃO RBMC-UFPR SEM TENDÊNCIA .....	106

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PRINCIPAIS CONSTELAÇÕES GNSS.....	54
QUADRO 2 - ÍNDICE DE INTENSIDADE .....	60
QUADRO 3 - CAPACIDADE DE CADA MÉTODO EM IDENTIFICAR O MOVIMENTO. ....	61

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PESQUISAS NACIONAIS ENVOLVENDO A TÉCNICA PSINSAR.....	22
TABELA 2 - PESQUISAS INTERNACIONAIS ENVOLVENDO A TÉCNICA PSINSAR. ....	27
TABELA 3 - ESTUDOS QUE ENVOLVERAM OBSERVAÇÕES GNSS PARA IDENTIFICAR SUBSIDÊNCIAS .....	35
TABELA 4 - MISSÕES COM SAR .....	39
TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DAS BANDAS E SUAS FREQUÊNCIAS E COMPRIMENTO DE ONDA.....	41
TABELA 6 - PROGRAMAS PARA PROCESSAMENTO INTERFEROMÉTRICO.....	53
TABELA 7 - PRECISÃO ESPERADA PARA UM LEVANTAMENTO PPP - ESTÁTICO .....	55
TABELA 8 - PRECISÃO DE ALGUNS MÉTODOS DE POSICIONAMENTO.....	56
TABELA 9 - ESCALA DE VELOCIDADES DE DESLIZAMENTOS .....	59
TABELA 10 - INFORMAÇÕES DOS ÂNGULOS AZIMUTAIS E DE INCIDÊNCIA DA IMAGEM M CAPTURADA NO DIA 9/02/2020. ....	80
TABELA 11 - NÚMERO DE IMAGENS SLC-SAR UTILIZADAS NO PROCESSAMENTO PSINSAR - CURITIBA.....	81
TABELA 12 - INFORMAÇÃO DE RUÍDO DOS INTERFEROGRAMAS 2017-2018..	87
TABELA 13 - INFORMAÇÃO DE RUÍDO DOS INTERFEROGRAMAS 2021-2022..	87
TABELA 14 - RESUMO DOS PS CLASSIFICADOS NOS INTERVALOS DEFINIDOS NA FIGURA 29.....	93
TABELA 15 - QUANTITATIVO DE PS IDENTIFICADOS NOS PROCESSAMENTOS DOS ANOS DE 2016 A 2022.....	102
TABELA 16 - VELOCIDADES RELATIVAS DAS ESTAÇÕES DA REDE GUABIROTUBA. ....	103
TABELA 17 - VELOCIDADES EM LOS DOS PS DETECTADOS PRÓXIMOS AOS MARCOS DA REDE DO GUABIROTUBA. ....	104
TABELA 18 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS SÉRIES TEMPORAIS. ....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

A-DInSAR	- <i>Advanced-DInSAR</i>
ALOS	- <i>Advanced Land Observing Satellite</i>
BDS	- <i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
CPRM	- <i>Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais</i>
CPTA	- <i>Coherent Point Target Analysis</i>
CPT	- <i>Coherent Pixel Technique</i>
DD	- <i>Dupla Diferença</i>
DGPS	- <i>GPS Diferencial</i>
DInSAR	- <i>Diferencial Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>
DORIS	- <i>Delft object-oriented radar interferometric software</i>
DS	- <i>Distributed Scatterers</i>
EOPs	- <i>Parâmetros de Orientação da Terra</i>
ERS	- <i>European Remote Sensing</i>
ESA	- <i>European Space Agency</i>
EW	- <i>Extra Wide swath mode</i>
FOC	- <i>Full Operational Capabitily</i>
GAMIT	- <i>GNSS at MIT</i>
GAMMA	- <i>Gamma SAR Processor and Interferometry Software</i>
GEOMATICA	- <i>Geomatica InSAR package</i>
GBR	- <i>Ground-Based Radar</i>
GIAnt	- <i>Generic InSAR Analysis Toolbox</i>
GLOBK	- <i>Global Kalman filter</i>
GLONASS	- <i>Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GMTSAR	- <i>Generic Mapping Tools</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
GRD	- <i>Ground Range Detected</i>
IBGE	- <i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
ISCE	- <i>InSAR Scientific Computing Environment</i>
InSAR	- <i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
IPTA	- <i>Interferometric Point Target Analysis</i>
IRNSS	- <i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>

ITRF	<i>-International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>-International Terrestrial Reference System</i>
IW	<i>-Interferometric Wide swath mode</i>
LAGEH	<i>-Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia</i>
LB	<i>-Linha Base</i>
LiCSBAS	<i>-Looking inside the Continents from Space</i>
LoS	<i>-Line-of-Sight</i>
M	<i>-Imagem Mestre</i>
MDE	<i>-Modelo Digital de Elevação</i>
MIDAS	<i>-Median Interannual Difference Adjusted for Skewness</i>
MintPy	<i>-Miami INsar Time-series software in Python</i>
MMQ	<i>-Método de Mínimos Quadrados</i>
MT-InSAR	<i>-Multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
NavIC	<i>-Navigation Indian Constellation</i>
NISAR	<i>-NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar</i>
POLIMI	<i>-Politecnico di Milano</i>
PP	<i>-Posicionamento por Ponto</i>
PPP	<i>-Posicionamento por Ponto Preciso</i>
PPP-RT	<i>-Posicionamento por Ponto Preciso Real Time</i>
PPP-RTK	<i>-Posicionamento por Ponto Preciso Real Time Kinematic</i>
PRN	<i>-Pseudo Randon Noise</i>
PS	<i>-Persistent Scatterer</i>
PSC	<i>-Candidatos a Persistent Scatterer</i>
PSIG	<i>-PSI chain of the Geomatics Division of Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya</i>
PSInSAR™	<i>-Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
QGIS	<i>-Open-Source Geographic Information System</i>
QZSS	<i>-Quasi-Zenith Satellite System</i>
RAAP	<i>-Rede Altimétrica de Alta Precisão</i>
RADAR	<i>-Radio Detection and Ranging</i>
RAR	<i>-Real Aperture Radar</i>
RBMC	<i>-Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS</i>
RINEX	<i>-Receiver Independent Exchange Format</i>
RMC	<i>-Região Metropolitana de Curitiba</i>

RMS	- <i>Root Mean Square</i>
RN	- <i>Referência de Nível</i>
ROI_PAC	- <i>Repeat Orbit Interferometry PACkage</i>
RTC	- <i>Radiometric Terrain Correction</i>
RTK	- <i>Real Time Kinematic</i>
S	- <i>Imagem Secundária</i>
SANEPAR	- <i>Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba</i>
SAR	- <i>Synthetic Aperture Radar</i>
SARPROZ	- <i>SAR PROcessing tool by periZ</i>
SBAS	- <i>Small Baseline Subset</i>
SeaSat	- <i>Seafaring Satellite Mission</i>
SIRGAS	- <i>Sistema de Referência Geodésico para as Américas do Sul</i>
SLC – SAR	- <i>Single Look Complex - Synthetic Aperture Radar</i>
SLC	- <i>Single Look Complex</i>
SM	- <i>Stripmap</i>
SNAP	- <i>ESA's SentiNel Application Platform</i>
SNAPHU	- <i>Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping</i>
SNR	- <i>Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído)</i>
SPINUA	- <i>Stable Point INterferometry over Unurbanized Areas</i>
SRTM	- <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SSR	- <i>Slope Stability Radar</i>
StaMPS	- <i>Stanford Method for Persistent Scatterers</i>
TanDEM-L	- <i>TerraSAR-L add-on for Digital Elevation Measurement</i>
TOPSAR	- <i>Terrain Observation with Progressive Scanning SAR</i>
TRAIN	- <i>Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise</i>
UFPR	- <i>Universidade Federal do Paraná</i>
WV	- <i>Wave mode</i>
ZTD	- <i>Zenith Total Delay</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
1.2	OBJETIVOS .....	20
1.2.1	Objetivo geral .....	20
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
1.3	ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>22</b>
2.1	ESTADO DA ARTE .....	22
2.1.1	Aplicações da Técnica PSInSAR™ no Brasil .....	22
2.1.1.1	Considerações Gerais sobre as Pesquisas Nacionais .....	26
2.1.2	Aplicação da PInSAR Internacionalmente .....	26
2.1.2.1	Considerações Gerais sobre as Pesquisas Internacionais.....	35
2.1.3	Estudos que Envolveram Observações GNSS para Identificar Subsidências .....	35
2.2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	38
2.2.1	Radar de Abertura Sintética .....	38
2.2.2	Tipos de Bandas e a Capacidade de Penetração .....	41
2.2.3	Modo de Aquisição e formação da Imagem SAR .....	43
2.3	INTRODUÇÃO A ABORDAGEM MT-INSAR.....	44
2.3.1	Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR™) .....	45
2.3.1.1	Seleção dos Pixels Candidatos a PS.....	50
2.3.1.2	Pacotes de Programas para Processamento Interferométrico .....	52
2.4	O GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM - GNSS.....	53
2.4.1	Métodos de Posicionamento GNSS .....	54
2.4.2	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) .....	56
2.5	MOVIMENTO DE MASSAS.....	57
2.5.1	Classificação do Movimento de Massa Conforme a sua Velocidade.....	58
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>62</b>
3.1	MACEIÓ – CIDADE COM HISTÓRICO DE SUBSIDÊNCIA (BAIRRO PINHEIRO).....	62
3.2	CURITIBA – BAIRRO GUABIROTUBA .....	63

3.2.1	Aspectos Geológicos da Cidade de Curitiba .....	64
3.2.2	Rede Materializada no Bairro do Guabirota.....	66
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>69</b>
4.1	MODO DE AQUISIÇÃO E FORMAÇÃO DA IMAGEM SAR DOS SATÉLITES SENTINEL-1 .....	70
4.2	PROCESSAMENTO PSINSAR™ USANDO A INTEGRAÇÃO SNAP-STAMPS.....	72
4.3	METODOLOGIA EMPREGADA PARA ANÁLISE DE SUBSIDÊNCIAS.....	73
4.3.1	Etapa A – Processamento PSInSAR™ em uma Área com Histórico de Subsidência .....	75
4.3.2	Etapa B – Processamento interferométrico sobre o bairro do Guabirota..	77
4.3.2.1	Processamento PSInSAR™ do Período de 2016-2022.....	79
4.3.2.2	Processamento PSInSAR™ para os anos de 2016 a 2022.....	80
4.3.3	Etapa C – Comparação das velocidades e dos deslocamentos relativos dos PS do processamento PSInSAR™ e do estudo realizado com o GPS. ....	82
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>85</b>
5.1	RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA-A (MACEIÓ).....	85
5.2	RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA-B .....	95
5.2.1	Processamento PSInSAR™ do Período de 2016-2022.....	95
5.2.2	Processamento PSInSAR™ para os anos de 2016 a 2022.....	101
5.3	RESULTADOS OBTIDOS EMPREGANDO OS PROCEDIMENTOS DEFINIDOS NA ETAPA-C.....	103
5.3.1	Comparação entre as Velocidades obtidas pela PSInSAR™ e o GPS – Resultado Processamento 2016-2022.....	103
5.3.2	Comparação entre as Velocidades obtidas pela PSInSAR™ e o GPS – Resultado Processamento anual de 2016 a 2022 .....	104
5.3.3	Comparação entre as Séries Temporais da Estação RBMC-UFPR e PS vizinhos – Processamento 2016-2022.....	105
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>111</b>
	<b>ANEXO I – RESUMO ARTIGO 1 – JÁ PUBLICADO .....</b>	<b>125</b>
	<b>ANEXO II – RESUMO ARTIGO 2 – JÁ PUBLICADO .....</b>	<b>127</b>
	<b>ANEXO III – RESUMO ARTIGO 3 – NÃO PUBLICADO .....</b>	<b>129</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo as Nações Unidas (2019), mais da metade da população mundial vive em áreas urbanas, esse número, assim como o tamanho dessas regiões, continuarão a crescer – fato este impulsionado por uma combinação de elementos tais como o excedente de nascimentos, êxodo rural e o surgimento de novas áreas urbanizadas que anteriormente eram rurais. No Brasil, por exemplo, no ano de 1950 o país continha uma população de aproximadamente 54 milhões de habitantes; sendo que 36% deste total viviam em áreas urbanas. No ano de 2018 essa concentração passou para 87% do total de 211 milhões de indivíduos e a projeção para 2050, de acordo com a mesma fonte, é que esse valor atinja 83%.

Esse rápido crescimento urbano, contudo, traz consigo consequências latentes, como por exemplo, o acúmulo de lixo, o aumento da poluição sonora, da água e do ar e a perda da biodiversidade. Além disso, como aponta Silva *et al.* (2014), as deficiências urbanísticas afetam não apenas a dimensão ambiental, mas também a área social que gera problemas como a violência e a segregação socioespacial. A atração dos grandes centros urbanos também leva à imigração de pessoas, resultando em uma competição excessiva por espaço.

Essa competição excessiva, pode levar a intervenções inadequadas na paisagem natural e à construção de edifícios e infraestruturas sem considerar a capacidade de suporte do solo. O excesso de impermeabilização do solo, que impede a infiltração da água da chuva e aumenta o volume de escoamento superficial, pode levar ao aumento da erosão do solo e à formação de sulcos e ravinas, que corroboram com o risco de deslizamentos e subsidências (GARRIDO e BOTELHO, 1996).

Dentro do contexto do processo de subsidência, ela, sobretudo, pode ser causada, de acordo com Du (2017), por duas fontes distintas: atividades antropogênicas e fenômenos naturais. A subsidência resultante de atividades humanas é causada pelo colapso da estrutura geológica, que pode ser resultante de diversas ações, como mineração subterrânea, extração de recursos naturais, construção de túneis subterrâneos e pressões exercidas por construções sobre uma determinada área. Por outro lado, a subsidência provocada por eventos naturais pode ser consequência de deformações causadas por terremotos ou erupções vulcânicas. No geral, esses tipos de alterações do solo podem causar graves consequências na

infraestrutura urbana e afetar a segurança e integridade física das pessoas que ali residem.

Nesse sentido, atualmente há vários métodos que permitem detectar e monitorar subsidências em uma determinada localidade, como, por exemplo, o uso de inclinômetros (MEDHAT et al., 2023; LI et al., 2014), monitoramento geofísico (ZHOU et al., 2022; GUO et al., 2020) e monitoramento com observações da constelação GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Este último, contudo, é amplamente utilizado para monitorar pequenas variações no nível do solo, pois pode ser realizado periodicamente e isso pode ser observado em estudos como o de Amagua et al. (2022), Vazquez-Ontiveros et al. (2022), Mantovani et al. (2022), Zhao et al. (2020), Wang et al. (2020), Andreas et al. (2019) e Choudhury et al. (2018). Embora esses métodos tenham alta precisão, eles apresentam limitações na interpretação devido à baixa densidade de pontos de monitoramento e ao fato de que as medições de campo são trabalhosas, demoradas e caras, como apontado por Qu et al. (2015).

Outra forma para detectar e monitorar subsidência é o uso de técnicas de sensoriamento remoto como o emprego da interferometria de imagens radar de abertura sintética (*Interferometry Synthetic Aperture Radar – InSAR*) com uma abordagem multitemporal (*Multitemporal InSAR – MT-InSAR* ou *Advanced-DInSAR – A-DInSAR*). A MT-InSAR combina múltiplas imagens de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*) capturadas em diferentes momentos para acompanhar mudanças na superfície e quantificar a deformação ocorrida entre as imagens (SINGH VIRK, SINGH e MITTAL, 2018). Essa técnica é útil para uma variedade de aplicações, incluindo o monitoramento da atividade vulcânica (PELTIER et al., 2010), a detecção de subsidências e/ou elevações (RUIZ-ARMENTEROS; LAZECKY e RUIZ-CONSTÁN; et al., 2018), mapeamento do movimento do solo causado por terremotos (ALATZA et al., 2020), mineração (DECLERCQ et al., 2023; DING et al., 2022; LU et al., 2019; TEMPORIM et al., 2017) e outros processos geológicos (LIU et al., 2023; LUO et al., 2022; GUO et al., 2017; CZIKHARDT et al., 2017). Atualmente existem diversas técnicas que empregam uma abordagem MT-InSAR, tais como a *Coherent Pixel Technique* (CPT) (BLANCO-SÁNCHEZ et al. 2008), *Small Baseline Subset* (SBAS) (BERARDINO et al., 2002), *SqueeSAR* (FERRETTI et al., 2011), *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA) (WERNER et al. 2003), *SARPROZ* (PERISSIN et al., 2011), *Stanfords Method for Persistent Scatterers*

(StaMPS) (HOOPER et al., 2010), *Persistent Scatterer Interferometric* (PSI ou PSInSAR™) (FERRETTI et al. 2000, 2001), dentre outras.

Ao combinar informações obtidas por meio das medições GNSS e da MT-InSAR, é possível obter uma imagem mais completa e precisa das deformações do terreno. O GNSS fornece informações precisas sobre a posição de um objeto com alta resolução temporal, enquanto a MT-InSAR é capaz de detectar pequenas deformações em extensas áreas, ou seja, alta resolução espacial (HU et al., 2018). Juntas, essas técnicas podem ser utilizadas para monitorar e avaliar o potencial de desastres naturais, como terremotos, deslizamentos de terra e erosão costeira. Estudos envolvendo a integração MT-InSAR e GNSS podem ser observados em Pezzo et al. (2023), Kumar Maurya et al. (2022), de Luna et al. (2021), Yalvac (2020), Farolfi et al. (2019), Hu, Chen e Zhang (2019), Ruiz-Armenteros et al. (2018), Chen et al. (2017), Roque et al. (2016), Hastaoglu (2016) e Komac et al. (2015).

Em relação à subsidência, o caso da cidade de Maceió, especialmente nos bairros Pinheiro, Bebedouro, Bom Parto e Mutange, é emblemático. Em 3 de março de 2018, um terremoto de magnitude 2,4 (segundo a escala brasileira de magnitude local) desencadeou o aparecimento de fissuras em residências, edifícios e vias públicas (CPRM, 2019). O resultado foi a classificação de 6.356 edifícios como zonas de risco e sua subsequente demolição pelas autoridades brasileiras, com os moradores sendo realocados para áreas mais estáveis. De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM (2020), as taxas de velocidade de subsidência variaram de -187,99 a -72 mm/ano entre 2016 e 2018, e de -235,7 a -100 mm/ano entre 2018 e 2019. Utilizando a abordagem multitemporal e dados do Sentinel 1, Euillades et al. (2020) identificaram taxas de subsidência que variaram de -20 a 20 mm/ano.

Na cidade de Curitiba, mais precisamente no bairro Guabirota, Werlich (2017) observou indícios de subsidência de solo naquela região. A pesquisa envolveu a implantação de uma rede de monitoramento *Global Positioning System* (GPS) que permitiu realizar o acompanhamento temporal das coordenadas geodésicas dos pontos e assim quantificar esse fenômeno. Através de nove campanhas GPS realizadas entre os anos de 2014 e 2019 foi identificada uma taxa de subsidência de 1 a 16 mm/ano, onde todos os marcos implantados tiveram um movimento vertical, o qual foi correlacionado com a formação geológica daquela região (WERLICH, 2017).

Considerando os benefícios advindos da integração das informações obtidas por meio das medições GNSS e da MT-InSAR, e tendo em vista um processo de subsidência previamente identificado por Werlich (2017), o propósito central desta pesquisa foi aprofundar a compreensão do fenômeno de subsidência no bairro do Guabirota. Essa investigação se realizou através da aplicação da técnica interferométrica com uma abordagem multitemporal, exemplificada pela PSInSAR™. Nesse contexto, o cerne da indagação é se a abordagem interferométrica multitemporal detém a capacidade de identificar taxas de deslocamento, abrangendo desde movimentações lentas até aquelas de extrema lentidão. Desse modo, busca-se confirmar a possibilidade de detecção desses movimentos, já caracterizados por taxas de deslocamento conhecidas, como o processo ocorrido em Maceió, e também taxas de deslocamento presentes em áreas propensas à subsidência, tal qual o fenômeno identificado por Werlich (2017).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Como apresentado anteriormente, a deformação do solo em áreas urbanas pode gerar impacto direto à vida dos moradores, principalmente quando esse fenômeno causa danos às propriedades de um indivíduo. Portanto, ter a capacidade de medir esse fenômeno por um longo período de tempo pode corroborar em uma melhor compreensão dos riscos naturais e, conseqüentemente, ajudar na elaboração de estratégias que visam minimizar os impactos que este possa causar.

Por outro lado, desde o lançamento da primeira missão com a tecnologia SAR para aplicações civis, a *SeaWiFS Satellite Mission* (SeaSat) – que ocorreu em 1978 –, muitas outras missões foram colocadas em órbita como, por exemplo, a *European Remote Sensing* (ERS1/2) (1991-2001/1995-2011), ENVISAT (2002-2012), ALOS-1/2 (2006-2011/2014-), RADARSAT1/2 (1995-2013/2007-), TerraSAR-X (2007) e, a missão Sentinel-1 lançada em 2014 com dados de acesso livre imageados na banda-C. Outras missões estão para serem lançadas nos próximos anos, sendo que proporcionarão dados de livre acesso na banda-L como a *NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar* (NISAR) e a *TerraSAR-L add-on for Digital Elevation Measurement* (TanDEM-L) e; a missão BIOMASS com sensor SAR operando na banda-P. Logo, têm-se um montante relevante de dados SAR que podem e poderão ser usados no monitoramento de deformações por meio de processamento InSAR. A InSAR, ressalta-se a MT-InSAR, é uma tecnologia madura e vem mostrando confiabilidade

nas precisões alcançadas e, além disso, é uma ferramenta de baixo custo, tornando democrática a sua aplicabilidade, permitindo, desse modo, a construção de capacidades para qualquer agente, nação ou país que estão aquém ao acesso de tecnologias mais complexas.

Nesse sentido, justifica-se esse trabalho quanto ao uso da técnica InSAR integrada à Geodésia Espacial a fim de identificar, quantificar e, assim, fornecer um mapeamento com informações históricas de deformação da área afeta pelo efeito da subsidência.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 *Objetivo geral*

Explorar fenômenos de subsidência em contextos urbanos utilizando a interferometria diferencial em imagens SAR com uma abordagem multitemporal, com ênfase na utilização da técnica PSInSAR™.

### 1.2.2 *Objetivos específicos*

- a) Analisar a capacidade da PSInSAR™ em detectar subsidência em uma área com histórico de subsidência. Caso de estudo: Cidade de Maceió;
- b) Realizar uma análise do processamento PSInSAR™ utilizando imagens do período 2016-2022 sobre o Bairro do Guabirota – Curitiba e comparar com o resultado do processamento anual (2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022) sobre a mesma área;
- c) Comparar e analisar as velocidades GPS e da PSInSAR™ das estações GPS da rede do Guabirota;
- d) Analisar e correlacionar os deslocamentos relativos das séries temporais da estação referência GPS com a PS obtidos com a PSInSAR™.

### 1.3 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

A tese está estruturada em seis capítulos. O primeiro capítulo descreve o problema, hipótese, objetivos e justificativa relacionados à abordagem do trabalho. O segundo capítulo apresenta o estado da arte das pesquisas que envolvem o uso da interferometria com uma abordagem multitemporal, com foco na técnica PSInSAR™. Além disso, aborda conceitos sobre o movimento de massas e o uso da tecnologia do sistema GNSS para detectar e monitorar subsidências.

O terceiro capítulo apresenta as áreas de estudo onde foram realizadas análises de subsidência. No primeiro caso, utilizou-se uma área com histórico de subsidência para testar a capacidade da técnica PSInSAR™ em detectar essa subsidência. No segundo caso, apresenta-se a área onde foi detectada subsidência empregando observações do GPS. O capítulo quatro exhibe a metodologia empregada nos estudos realizados nas áreas definidas no capítulo três. O capítulo cinco apresenta os resultados e as discussões. E, por fim, o capítulo seis apresenta as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

Os anexos I, II e III apresentam os artigos desenvolvidos durante a elaboração da tese. O Anexo I exhibe parte da revisão teórica e tem como principal objetivo mostrar o uso da técnica PSInSAR™ em âmbito nacional e internacional para detectar, monitorar e reconstituir o processo de subsidência em uma determinada área. No Anexo II encontra-se o artigo que descreve o processo de detecção de subsidência em uma área com histórico de subsidência, localizada no bairro Pinheiro - Maceió. Já o Anexo III apresenta o artigo que compara as velocidades obtidas por meio das observações GNSS e os resultados advindos do processamento PSInSAR™.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ESTADO DA ARTE

Este capítulo visa acentuar tanto pesquisas de âmbito nacional quanto internacional que utilizaram a Interferometria Diferencial por meio de uma abordagem multitemporal, com ênfase na técnica PSInSAR™, para investigar movimentos de massa. Em sequência, são destacados alguns estudos que empregaram observações GNSS para calcular e aprofundar a compreensão do processo de subsidência em uma área específica.

#### 2.1.1 Aplicações da Técnica PSInSAR™ no Brasil

No Brasil estudos que envolvem a interferometria é bastante restrito, poucas instituições realizam pesquisas nessa área. A Tabela 1 reúne exemplos de pesquisas conduzidas no país que utilizaram a técnica PSInSAR™ como ferramenta para obter informações sobre deslocamentos superficiais em áreas específicas. Observa-se que a aplicação dessa técnica tem sido predominantemente direcionada a ambientes de extração de minérios, focando na monitorização de suas estruturas e arredores.

Tabela 1 - Pesquisas Nacionais Envolvendo a Técnica PSInSAR.

<b>Autor</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Localização</b>	<b>Missão</b>	<b>Pacote</b>
Guerra, Cecarelli e Lomonaco (2011)	Subsidência	Ibirama - SC	TerraSAR-X	GAMMA
Paradella et al. (2012)	-	INPE	-	-
Ramos (2013)	Subsidência	Manaus - AM	Radarsat-1/2	GAMMA
Hartwig (2014)	Mineração	Carajás - PA	TerraSAR-X	GAMMA
Pinto (2015)	Mineração	Carajás - PA	TerraSAR-X	GAMMA
Paradella et al. (2015)	Mineração	Carajás - PA	TerraSAR-X	-
Bohane et al. (2015)	Subsidência	Canto do Amaro-RN	COSMO-SkyMed	<i>SqueeSAR™</i>
Mura et al. (2016)	Mineração	Carajás - PA	TerraSAR-X	-
Temporim et al. (2017)	Mineração	Carajás - PA	TerraSAR-X	GAMMA
Silva et al. (2017)	Mineração	Carajás - PA	TerraSAR-X	GAMMA
Negrão (2018)	Mineração	Mariana - MG	TerraSAR-X	GAMMA
Gama et al. (2019)	Mineração	Mariana - MG	TerraSAR-X	-
Paradella, Mura e Gama (2021)	Mineração	Carajás - PA	-	-

Fonte: O autor (2023).

Guerra, Cecarelli e Lomonaco (2011) procuraram investigar os potenciais movimentos da superfície que poderiam ter relação com a instabilidade superficial induzida pelo fluxo de água ao longo do eixo de um túnel subterrâneo da UHE Salto

Pilão, em Ibirama - SC. Ao longo desse túnel foi possível identificar uma densidade média de 85 PS/km<sup>2</sup>, porém, a taxa de deslocamento de cada PS não foi apresentada neste trabalho.

Paradella et al. (2012) como pioneiros na utilização de técnicas interferométricas em ambiente de pesquisa aplicada a indústria extrativista mineral realizaram uma revisão dos principais conceitos do SAR, InSAR, PSInSAR™ e da técnica SBAS. Enfatizaram também as perspectivas do uso dessa tecnologia no âmbito nacional.

Ramos (2013) buscou caracterizar os possíveis movimentos em áreas urbanas equatoriais empregando técnicas MT-INSAR em uma pilha de 24 imagens SLC-SAR (*Single Look Complex - Synthetic Aperture Radar SLC-SAR*, veja item 4.1). O estudo foi realizado na cidade de Manaus – AM, o qual identificou movimentação crustal em regiões próximas às áreas de drenagem. Esses movimentos, de acordo com o autor, apresentaram uma taxa de subsidência de 0,007 cm/dia. A validação dos resultados foi feita a partir da comparação da feição geológico-geomorfológica e não por uma rede *Global Navigation Satellite System* (GNSS), por exemplo, pelo motivo da ausência desta na área de estudo.

Hartwig (2014) fez um monitoramento de taludes presentes em minas de mineração na Mina N4W, localizada na Serra de Carajás – PA. Através dos resultados, o autor verificou que os taludes apresentaram um comportamento estável para o período de aquisição das imagens. Observou, também, diferenças nos resultados referentes aos períodos seco e chuvoso – sendo que o período chuvoso apresentou um maior deslocamento em relação ao período seco. Este autor realizou uma análise dos erros provenientes dos efeitos atmosféricos através da PSInSAR™ que, por meio desta, identificou uma variação de  $\pm 10$  mm em cada um dos interferogramas diferenciais tanto no período seco quanto no período chuvoso.

Pinto (2015) empregou a técnica PSInSAR™ para analisar alguns deslocamentos em torno da mina de manganês, a qual está inserida na porção central da Província Mineral de Carajás, no município de Parauapebas – PA. Como resultado, os autores obtiveram uma densidade média de 8588PS/km<sup>2</sup> e 4680 PS/km<sup>2</sup> no período seco e úmido, respectivamente; sendo que a taxa de deslocamento (LoS) máxima obtida em alguns PS foi de -17,02 cm/ano nas estações secas e -14,50 cm/ano nas estações chuvosas. A validação dos resultados se deu por meio de observações advindas de sensores *ground-based* tal como o *Slope Stability Radar* (SSR), porém,

segundo os autores, devido ao curto período de observação do sensor SSR, foi possível identificar apenas um valor máximo acumulado de deslocamento de 15 mm.

Paradella et al. (2015) aplicaram a técnica SqueeSAR™ em uma pilha de 33 imagens SLC-SAR em uma área de mineração, a qual está inserida na porção central da Província Mineral de Carajás – PA. Em uma das glebas, os autores encontraram uma taxa de deslocamento de -205,7 mm/ano. Os resultados foram comparados com informações medidas por estação-total, SSR, mapas geológicos e geomecânicos, e a abordagem, como aponta os autores, mostrou-se eficaz no monitoramento do deslocamento do solo naquela região.

Bohane et al. (2015) usaram a SqueeSAR™ em 30 imagens SLC-SAR para caracterizar deslocamentos do terreno no campo petrolífero de Canto do Amaro, o qual está localizado na porção emersa da Bacia Potiguar, situada no extremo leste da Margem Continental Brasileira, ocupando grande parte do Estado do Rio Grande do Norte e uma pequena porção do Estado do Ceará. Como resultado, foram encontrados 922 PS/km<sup>2</sup> com valores de deslocamento de até +87 mm. O desvio padrão médio das taxas de deslocamento foi de 3,0 mm/ano. Segundo os autores, esse valor ficou dentro dos limites normais, pois o número de imagens analisadas, o intervalo de tempo das imagens e o tamanho da área corroboraram com os resultados obtidos.

Mura et al. (2016) realizaram um estudo focado no monitoramento de movimentos não-lineares em área de minas de ferro situada na Província Mineral de Carajás – PA. Os autores utilizaram um conjunto de 33 imagens SLC-SAR. Como resultado, foi obtido uma densidade de 16635 PS/km<sup>2</sup> os quais apresentaram uma taxa de deslocamento máxima de -340 mm/ano. A validação do resultado foi realizada com medições de três prismas (usando a técnicas com equipamentos estação-total/prismas) e medições no terreno por meio de *Ground-Based Radar* (GBR). Comparou-se 15 PS (que estavam próximos aos prismas) e, de acordo com os autores, foi possível detectar uma diferença média de 0,082, 1,12 e 1,27 cm entre os prismas e os PS. As medições de GBR também mostraram evidências de movimento do solo, porém, devido ao curto tempo de monitoramento, não foi possível realizar a comparação com a medição PSInSAR™ devido à incerteza do posicionamento do GBR.

Temporim et al. (2017) fizeram um monitoramento de deslocamentos superficiais de uma mina de ferro (localizada na Província Mineral de Carajás – PA)

empregando-se 33 imagens SLC-SAR. Sendo que no período chuvoso, os autores encontraram uma densidade de 1135 PS/km<sup>2</sup> com valor máximo de subsidência de -0,95 cm/ano e, no período seco, uma densidade de 1942 PS/km<sup>2</sup> com uma taxa de deslocamento de -1,18 cm/ano. A validação dos resultados foi feita com medidas realizadas por estação total/prisma, as quais foram projetadas na direção da LoS de modo que estivessem na mesma projeção que os dados gerados pelo processamento interferométrico. Como resultado, o valor dos deslocamentos máximos em um determinado ponto, no período chuvoso, foi de -0,54 cm e -0,488 cm para dados advindos da estação total/prisma e do processamento PSInSAR™, respectivamente. No período seco, obteve-se uma subsidência de -1,255 cm e -0,725 cm para a estação total/prisma e a PSInSAR™, concomitantemente. De acordo com os autores, após a validação estatística, as análises SAR forneceram dados compatíveis com técnicas de monitoramento de medição em campo, as quais foram consideradas precisas.

Silva et al. (2017), com o mesmo foco de Mura et al. (2016), analisaram movimentos superficiais em área de minas de ferro (situada na Província Mineral de Carajás – PA) aplicando 33 imagens SLC-SAR. Os conjuntos de imagens usadas nos dois trabalhos foram adquiridas no mesmo período (março de 2012 a abril de 2013). Os autores validaram os resultados a partir de medições feitas por estação-total/prisma. O erro calculado entre o resultado da PSInSAR™ e da estação/prismas forneceram uma diferença média de 0,085, 1,19 e 1,29 cm e um valor quadrático médio ou RMS (do inglês *Root Mean Square*) de 0,25, 2,29 e 1,95 cm para os prismas 1, 2 e 3, respectivamente. Mesmo considerando esses erros, de acordo com os autores, houve uma boa concordância com os deslocamentos dos PS em relação às localizações dos prismas.

Negrão (2018) analisou a instabilidade da barragem de rejeito situada no Complexo de Mineração de Ferro de Germano na cidade de Mariana – MG. Nessa região, no dia 05 de novembro de 2015, a barragem denominada de Fundão rompeu. Após esse evento, o presente autor processou 30 imagens SLC-SAR e constatou que a região do complexo apresentava padrões de estabilidade em boa parte das estruturas e, além disso, estavam de acordo com as medidas topográficas locais. Nesse mesmo complexo, Gama et al. (2019) empregaram 46 imagens SLC-SAR obtidas no período de dezembro de 2015 a abril de 2016, e de acordo com esses autores, os dados dos PS comparados com os dados da estação-total/prisma, apresentaram valores médios que não extrapolaram o limite de estabilidade da

empresa, de  $\pm 13$  mm. No geral, de acordo com Gama et al. (2019) e Negrão (2018), a barragem de Germano apresentou tendência a uma estabilidade, mesmo considerando que os dados da estação/prisma apresentaram uma lenta subsidência, mas dentro do limite de segurança de estabilidade estabelecida pela empresa de monitoramento da barragem.

Paradella, Mura e Gama (2021) publicaram o livro cujo nome é “Monitoramento DInSAR para Mineração e Geotecnia”. Os autores buscaram apresentar uma obra atualizada com exemplos na área de mineração, cobrindo um panorama do SAR e da aplicabilidade da técnica DInSAR. Além disso, abordaram, também, informações sobre as técnicas MT-InSAR tal como a SBAS, a PSI (aqui definida como PSInSA™), a IPTA, a combinação da SBAS e com a IPTA e, finalmente, a SqueeSAR™.

#### 2.1.1.1 Considerações Gerais sobre as Pesquisas Nacionais

No contexto nacional, é evidente que as pesquisas que fazem uso da interferometria estão predominantemente concentradas em um único instituto de pesquisa, o que resulta em uma relativa falta de popularidade dessa técnica utilizando imagens SAR no Brasil. Devido a essa circunstância, observa-se que tais pesquisas têm foco principalmente em áreas ligadas à mineração, onde a análise de deformações é aplicada com o auxílio de softwares comerciais.

#### 2.1.2 Aplicação da PInSAR Internacionalmente

Desde Ferretti et al. (2000, 2001) a técnica PSInSAR™ vem sendo usada em diversas aplicações tais como no monitoramento e identificação de movimentos de estruturas, análises voltadas para identificação de deslizamentos de encostas e/ou deslocamentos causados por atividades vulcânicas, entre outras. Nesse sentido, procurou-se apontar alguns estudos que empregaram a técnica PSInSAR™ desde o início dos anos 2000 até o ano de 2021, porém, apenas as pesquisas consideradas de maior relevância foram incluídas na Tabela 2.

Nesse sentido, Colesanti et al. (2003) empregaram 55 e 61 imagens SLC-SAR da missão ERS tomadas sobre a região do Estado da Califórnia – EUA e Ancona – Itália, respectivamente. Usando a técnica PSInSAR™ na cidade de Los Angeles, por

exemplo, os autores encontraram uma densidade média de 150 PS/km<sup>2</sup> e, em um raio de 100 m de uma dada estação GPS, foram encontrados 26 PS com uma taxa de deslocamento médio de -4,42 mm/ano e, na dita estação GPS, obteve-se uma taxa média de -4,41 mm/ano. Por outro lado, em Ancona os autores obtiveram uma densidade de aproximadamente 820PS/km<sup>2</sup>, os quais apresentaram um deslocamento médio de ±6 mm/ano. A validação dos resultados não se concretizou pelo fato do número de campanhas de nivelamento realizados naquela região terem sido insuficientes, porém, os resultados, segundo os autores, denotaram uma boa concordância.

Tabela 2 - Pesquisas Internacionais Envolvendo a Técnica PSInSAR.

<b>Autor</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Localização</b>	<b>Missão</b>	<b>Pacote</b>
Colesanti et al. (2003)	Urbano	EUA/Itália	ERS	-
Hilley et al. (2004)	Urbano	EUA	ERS	-
Farina et al. (2006)	Rural	Itália	ERS	-
Perissin et al. (2006)	Urbano	Itália	ERS	-
Hooper, Segall e Zebker (2007)	Vulcão	Equador	ERS	StaMPS
Jiang et al. (2008)	Aeroporto	China	ENVISAT	CPTA
Hooper (2008)	Vulcão	Equador	ERS	StaMPS
Pei et al. (2009)	Urbano	China	ENVISAT	-
Chendeb El Rai e Simonetto (2009)	Urbano	França	ERS	DORIS/StaMPS
Perissin e Wang (2011)	Urbano	China	ERS	DePSI/StaMPS
Tapete et al. (2012)	Estrutural	Itália	ERS/RADARSAT	SqueeSAR™
Bovenga et al. (2012)	Rural/Urbano	Itália	SkyMed/ENVISAT	SPINUA
Vollrath et al. (2013)	Infraestrutura	Itália	ENVISAT	DORIS/StaMPS
Sousa et al. (2014)	Geológico	Espanha	ERS/ENVISAT	StaMPS
Oliveira et al. (2015)	Rural/Urbano	Portugal	TerraSAR-X	DORIS/StaMPS
Crosetto et al. (2015)	Urbano	México	Sentinel-1	PSIG
Roque et al. (2016)	Atmosfera	Lisboa	ENVISAT	SARPROZ
Ruiz-Armenteros et al. (2016)	Montanhas	Espanha	ERS/ENVISAT	StaMPS
Mahmud et al. (2016)	Urbano	Nigéria	Sentinel-1	StaMPS
Radutu, Nedelcu e Gocu (2017)	Urbano	EUA	PALSAR	-
Tsangaratos et al. (2017)	Urbano	Grécia	ERS	-
Cuevas-González et al. (2018)	Urbano	Espanha	Sentinel-1	-
Ruiz-Armenteros; Lazecky; Ruiz-Constán; et al. (2018)	Urbano	Espanha	Diversas	StaMPS/SARPROZ
Cian, Blasco e Carrera (2019)	Urbano	Nigéria	Diversas	SNAP/StaMPS
Evers et al. (2019)	Rural	Grécia	Sentinel-1	SNAP/StaMPS
Aslan et al. (2020)	Montanhas	França	Sentinel-1	StaMPS
Dumka et al. (2021)	Urbano	Índia	Sentinel-1	Diversos
Kothyari et al. (2021)	Urbano	Himalaya	Sentinel-1	SARPROZ
Long, Anh e Luyen (2021)	Urbano	Vietnã	Sentinel-1	StaMPS

Fonte: O autor (2023).

Estados Unidos da América (EUA); *Phased Array L-band SAR* (PALSAR); *Coherent Point Target Analysis* (CPTA); *Stable Point INterferometry over Unurbanized Areas* (SPINUA); *PSI chain of the Geomatics Division of Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya* (PSIG).

Hilley et al. (2004) usaram a técnica PSInSAR™ para analisar a dinâmica de deslizamentos lentos em Berkeley (região oeste de São Francisco – EUA). Os autores empregaram 46 imagens SLC-SAR obtidas no período de 1992 a 2001. Após o processamento, um total de 1428 PS foram utilizados para a análise, onde expressaram uma taxa de crescimento na variação de deslizamentos de  $\cong 5$  a 7 mm/ano, chegando a uma velocidade média de 27 a 28 mm/ano. Os autores constataram que essas variações aconteceram principalmente nos períodos chuvosos ocorridos durante o evento *El Niño*, no período de 1997 e 1998. Contudo, Hilley et al. (2004) concluíram que o método aplicado permitiu a identificação das variações sazonais de deslizamentos lentos.

Farina et al. (2006) realizaram uma investigação de deslizamentos na região central da Itália, onde empregaram 350 imagens SLC-SAR obtidas pela missão ERS no período de 1992 a 2002. Essa região fica a uma altitude média de 353 m acima do nível médio do mar. Através do processamento por meio da PSInSAR™, os autores constataram que a presença de PS em regiões montanhosas foi significativamente menor quando comparada com regiões adjuntas ao rio Arno (36,88 PS/km<sup>2</sup> contra 64,75 PS/km<sup>2</sup>). As velocidades médias encontradas pelos PS variaram de 7,0 a 13,7 mm/ano, com um valor médio de 9,5 mm/ano. Por outro lado, a velocidade média detectada pelo inclinômetro foi de 3,4 mm/ano; a diferença entre os PS e o inclinômetro, segundo os autores, se deu pelo fato de que as duas técnicas medem diferentes tipos de movimento – sendo que a PSInSAR™ obtém informações de deslocamentos na superfície e a outra mede deformações no interior do solo.

Perissin et al. (2006) processaram aproximadamente 200 imagens SLC-SAR da missão ERS na região urbana de Milão – Itália, sendo essas imagens obtidas em diferentes geometrias (ascendente e descendente). Devido a essas geometrias, os autores caracterizaram os parâmetros físicos dos PS por meio da análise da variação da amplitude. De acordo com os autores, as variações da amplitude ocorrem em função da geometria do satélite na época da aquisição das imagens, da temperatura do objeto e dependem, também, da extensão física e da orientação do alvo. Logo, a caracterização dos parâmetros físicos do PS seria um fator chave para prever o comportamento eletromagnético do sinal retroespalhado, permitindo, assim, a integração de dados de múltiplos sensores interferométricos SAR.

Hooper, Segall e Zebker (2007), por meio do StaMPS, aplicaram a técnica PSInSAR™ na região vulcânica de Alcedo – Equador com 29 imagens SLC-SAR da

missão ERS. Mas, de acordo com os autores, 12 imagens foram suficientes para chegar nos resultados almejados. Como resultado, na região interna do vulcão, os autores encontraram um RMS de 1,9 mm/ano. A taxa de deslocamento na componente leste ficou entre 6,5 a 6,7 mm/ano e 2,3 a 2,7 mm/ano na componente vertical. No ano seguinte, Hooper (2008) aplicou a técnica PSInSAR™ e a SBAS na região do vulcão *Eyjafjallajökul* (Islândia) usando 27 imagens SLC-SAR da missão ERS, onde obteve 177000 PS com a PSInSAR™ e 659000 PS com a SBAS. Com base nesta análise Hooper (2008) concluiu que o uso das duas técnicas corroborou na seleção de um número maior de pixels na região em estudo, proporcionando um aprimoramento na amostragem espacial dos PS e, também, um aumento na relação SNR dos *pixels* selecionados.

Jiang et al. (2008) aplicaram o algoritmo CPTA, que é uma abordagem aprimorada da PSInSAR™, em um conjunto de 20 imagens SLC-SAR da missão ENVISAT na região de um aeroporto localizado em Hong Kong. Um total de 1266 PS foram identificados (140 PS/km<sup>2</sup>) com uma velocidade média de 0,38 mm/ano. Os resultados, contudo, mostram que a maioria dos edifícios estavam estáveis e que a tal técnica foi crucial na identificação de deslocamentos de algumas estruturas tais como rodovias e campos de aviação.

Pei et al. (2009) realizaram um estudo com intuito de analisar a dinâmica da subsidência do solo na cidade de Shanghai. Os autores empregaram oito imagens SLC-SAR obtidas no período de 2007 a 2008. Como resultado, foram registrados 156782 PS com uma taxa de subsidência média de -25 a 10 mm/ano. Essas subsidências se concentraram na região central da cidade, chegando a uma taxa máxima de 24,2 mm. A validação destes resultados foi feita por meio de uma rede de nivelamento levantada no mesmo ano em que as imagens SLC-SAR foram tomadas. Segundo os autores, os resultados do nivelamento apresentaram uma boa consistência com o mapa de subsidência obtido pela PSInSAR™. Em suas conclusões, os autores indicaram que foi possível monitorar campos de subsidência – com uma precisão e confiabilidade razoáveis – usando imagens SLC-SAR obtidas dentro de uma janela temporal de apenas um ano.

Chendeb El Rai e Simonetto (2009) experimentaram a técnica PSInSAR™ em áreas urbanas para identificar o deslocamento do solo. Em um dos experimentos, os autores empregaram 11 imagens SLC-SAR obtidas pela missão ERS nos anos de 1997 a 1999 sobre a cidade de Paris – França, obtendo uma taxa de deslocamento

de 7 mm/ano. No final, os autores concluíram que a técnica PSInSAR™ permitiu medir taxas de deslocamentos em áreas urbanas com uma acurácia a nível milimétrica.

Perissin e Wang (2011) analisaram séries temporais obtidas por meio da PSInSAR™ sobre a cidade de Shanghai – China. Através de 40 imagens SLC-SAR da missão ERS obtidas nos anos de 1993 a 2000, os autores identificaram uma área com uma taxa de deslocamento que variou de -40 a 40 mm/ano e, ao ser validada com observações efetuadas por meio do nivelamento, o desvio padrão entre as duas técnicas ficou menor que 2 mm/ano. Algumas estruturas, como a barragem de *Three Georges* localizada no Rio de *Yangtze* na China, apresentou uma taxa de deslocamento de aproximadamente 10 mm/ano que pode ser consequência, de acordo com os autores, de uma construção próxima ao talude que tenha alterado a distribuição das águas subterrâneas e causando, assim, essa subsidência superficial.

Tapete et al. (2012) processaram um conjunto de imagens SLC-SAR da missão ERS e RADARSAT para analisar estruturas de sítios arqueológicos em Roma. No âmbito comparativo, os autores empregaram a técnica PSInSAR™ e a SqueeSAR™. Como conclusão, a SqueeSAR™ forneceu uma melhor identificação de pixels nos diferentes tipos de contextos arqueológicos o que corroborou em uma melhor análise de deslocamento naquela região.

Bovenga et al. (2012) exploraram as novas possibilidades oferecidas pelos sensores de radar de satélite de banda-X (COSMO/SkyMed) para avaliações de risco de deslizamentos em uma escala grande. Os autores usaram a técnica PSInSAR™ para processar as imagens SLC-SAR de média resolução da missão ENVISAT (banda-C) e as de alta resolução advindas da missão SkyMed (banda-X). Logo, demonstraram que para atingir uma precisão considerável nas velocidades de deslocamento médias, um menor número de imagens SLC-SAR da banda-X proporcionou resultados semelhantes ao uso de um número maior de imagens da banda-C. Nesse sentido, os pesquisadores obtiveram uma densidade média geral de PS do conjunto de dados da banda-X de cerca de 3 a 11 vezes maior em relação àquelas obtidas com imagens da banda-C. O processamento das imagens SLC-SAR foi feito no *software* SPINUA que permitiu obter uma taxa de deslocamento na direção LoS de 10-20 mm/ano.

Vollrath et al. (2013) processaram imagens SAR usando os pacotes StaMPS e ROI-PAC empregando diversas vertentes da técnica PSInSAR™. Foram utilizadas 96 imagens SLC-SAR da missão ENVISAT obtidas nos períodos de 2003-2006 e

2007-2010 sobre a área *Priolo-Gargallo* – Itália. Através dos resultados, os autores constataram que a combinação entre a PSInSAR™ e a SBAS proporcionou uma alta densidade de PS na área de estudo, o que corroborou na capacidade de identificar movimentos tectônicos, deslizamentos locais e deslocamentos com velocidades baixas.

Sousa et al. (2014) propuseram quantificar movimentos nas estruturas tectônicas ativas na região central *Betic Cordillera* (Granada) – Espanha. Para alcançar esse objetivo, os autores empregaram 29 imagens da ERS e 30 imagens da ENVISAT que foram obtidas no período de 1993-1999. O processamento se deu dentro do ambiente StaMPS com a integração dos métodos PSInSAR™ e SBAS. Como resultado, os autores obtiveram uma taxa de deslocamento média na direção de LoS de -10,3 mm/ano a 2,1 mm/ano, a qual eles correlacionaram com uma subsidência antropogênica e não-sísmica.

Oliveira et al. (2015) analisaram os deslizamentos ocorridos em uma área de aproximadamente 12 km<sup>2</sup> ao longo do rio Grande da Pipa (Lisboa- Portugal), foram usadas 16 imagens SLC-SAR obtidas no período de 2010-2011. Correlacionando os dados históricos de deslizamento da região com os dados obtidos com o processamento PSInSAR™, os autores constataram que, para um total de 39 deslizamentos de terra, foi possível atualizar a estabilidade destes – 23 se encontravam dormentes para reativados e 5 no estado estabilizado para reativado. A taxa média de deslocamento desses deslizamentos ficou entre 2 a 10 mm/ano, os quais foram considerados extremamente lentos. Nesse estudo, os autores conseguiram demonstrar o potencial da técnica PSInSAR™ em identificar deslizamentos de terra com uma taxa de deslocamento extremamente baixa, permitindo, assim, melhorar e atualizar inventários de uma dada área.

Crosetto et al. (2015) processaram 10 imagens SLC-SAR da missão Sentinel-1 obtidas no período de 2014-2015. O processamento se deu no pacote PSIG. Em uma área de aproximadamente 80×25 km foi obtido um total de 720882 PS (575 PS/km<sup>2</sup>) com uma subsidência máxima de 9 cm. Esse estudo foi um dos primeiros a usar imagens SLC-SAR da missão Sentinel-1 em um processamento empregando a técnica PSInSAR™.

Roque et al. (2016) correlacionaram os resultados de processamento de 10 estações GNSS com aqueles obtidos através de oito imagens SLC-SAR tomadas pela ENVISAT sobre a cidade de Lisboa – Portugal no período de 2008-2009. Os autores

usaram um mapa do *Zenith Total Delay* (ZTD) derivados das observações GNSS para corrigir os interferogramas. No entanto, eles verificaram que os resultados estavam diretamente relacionados com o número, com a distribuição espacial das estações GNSS e com a técnica de interpolação utilizada para calcular os mapas ZTD. Mesmo usando observações de 10 estações GNSS para gerar o mapa ZTD, os deslocamentos cumulativos obtidos ainda foram afetados pelos efeitos atmosféricos.

Ruiz-Armenteros et al. (2016) usaram três diferentes pacotes (StaMPS, SARPROZ e o P-SBAS) para processar 36 imagens SLC-SAR da ERS e 27 da ENVISAT obtidas nos anos de 1999-2000 sobre as *Serras Gorda e Tejada* – Espanha e, assim, analisar a performance dessas técnicas nessas áreas montanhosas. Como resultado, o método P-SBAS identificou uma quantidade relativamente baixa de PS comparado com o StaMPS e o SARPROZ, os quais apresentaram resultados semelhantes na identificação dos PS.

Na cidade de *Warri*, localizada na região costeira da Nigéria, Mahmud et al. (2016) aplicaram a PSInSAR™ para monitorar deslizamentos de terra. Os autores processaram 23 imagens SLC-SAR da ENVISAT (2006-2010) no StaMPS e alcançaram uma taxa de deslocamento máxima de  $\pm 5$  mm/ano. Durante as investigações preliminares das estruturas, particularmente os edifícios, os autores identificaram afundamentos e rachaduras de vários tipos e graus.

Radutu, Nedelcu e Gocu (2017) usaram a PSInSAR™ para obter uma visão geral de deslocamentos superficiais do solo causados pela dinâmica de águas subterrâneas. Na cidade de *San Luis Valley* – Colorado, por exemplo, os autores usaram 63 imagens SLC-SAR da missão ALOS PALSAR (banda-L) imageadas nos anos de 2007 a 2011. No verão do ano de 2010, os autores identificaram uma subsidência de 7,1 cm e, no inverno, uma elevação de 7,2 cm o que teria uma correlação espaço-temporal com a carga hidráulica daquela região.

Tsangaratos et al. (2017) aplicaram a técnica PSInSAR™ em uma área de 13700 km<sup>2</sup> na região central da Grécia usando imagens SLC-SAR da missão ERS, as quais foram obtidas no período de 1992-2003, para analisar fenômenos de subsidência do solo. As imagens foram processadas com a técnica PSInSAR™ e, como resultado, os autores obtiveram um total de 13895 PS com uma taxa média de deslocamento de +15,489 a -14,131 mm/ano. Na conclusão, os autores correlacionaram a subsidência com a exploração intensa dos aquíferos e as condições geológicas do terreno.

Cuevas-González et al. (2018) usaram 43 imagens SLC-SAR da missão Sentinel-1 para monitorar o deslocamento de terrenos e, além disso, modelar e corrigir o erro atmosférico nas observações geradas pelo processamento PSInSAR™. As etapas se deram com a modelagem e correção dos efeitos atmosféricos, determinação e remoção dos resíduos do erro topográfico dos interferogramas e, em seguida, o desdobramento tridimensional da fase, e assim, a determinação da taxa de deslocamento na direção da LoS. Como resultado, os autores obtiveram um deslocamento médio de 6 mm.

No período de 1992-2018, Ruiz-Armenteros; Lazecky; Ruiz-Constán; et al. (2018) analisaram a subsidência ocorrida em áreas com alta densidade populacional, polos industriais, aeroportos, portos, linhas férreas e rodovias por meio de processamento interferométrico. O estudo se deu na província de Málaga – Espanha com imagens das missões ERS (1992-2000), ENVISAT (2003-2009) e Sentinel-1A (2014-2018), todas obtidas na banda-C. O processamento das imagens da missão ERS e ENVISAT se deu no ambiente SARPROZ e as imagens Sentinel-1 na integração ISCE-StaMPS. Através dos resultados obtidos no processamento das imagens da ERS, os autores identificaram subsidências no polo industrial da cidade e, através das imagens da Sentinel-1A, identificaram subsidência próxima ao aeroporto. Como trabalhos futuros os autores propõem completar a pesquisa correlacionando os resultados obtidos com outras informações, tais como dados de precipitação, informações dos lençóis freáticos e gravidade, para, assim, entender a origem desses deslocamentos.

Baseando-se na integração SNAP-StaMPS, Cian, Blasco e Carrera (2019) usaram dados das missões TerraSAR (banda-X), COSMO-SkyMed (banda-X), ENVISAT (banda-C) e Sentinel-1 (banda-C) para identificar subsidências nas cidades de Banjul (Gâmbia) e Lagos (Nigéria). Por meio dos resultados, os autores constataram que, usando a banda-C, a precisão foi de 1,1 mm, enquanto utilizando a banda-X a precisão foi de 0,6 mm. Segundo os autores, os dados da banda-X são mais sensíveis às mudanças superficiais, porém, não são de livre acesso, por outro lado, dados da missão Sentinel-1, por serem de livre acesso, tornam-se mais viáveis em seu uso.

Após o deslizamento ocorrido na cidade de Patras – Grécia, Evers et al. (2019) fizeram um monitoramento pós-colapso para verificar se a área permanecia em movimento. Nesse sentido, os autores processaram uma pilha de 30 imagens SLC-

SAR da missão Sentinel-1 (2017-2019). O processamento das imagens envolveu a técnica PSInSAR™ e foi realizado via integração SNAP-StaMPS. Como resultado, os autores identificaram, mesmo a área de estudos sendo predominante rural, um total de 80 PS cuja taxa média de deslocamento ficou em  $\pm 8$  mm/ano, indicando que o deslizamento apresentava um sutil movimento pós-colapso.

Aslan et al. (2020) mapearam deslizamentos na região dos Alpes – França, onde usaram 58 e 50 imagens SLC-SAR da Sentinel-1 obtidas no modo ascendente e descendente, respectivamente. Os interferogramas foram gerados pelo *software* GMTSAR e o processamento da PSInSAR™ foi realizado no ambiente StaMPS. Para remover os efeitos atmosféricos dos interferogramas, foi usado o pacote de processamento *Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise* (TRAIN) – desenvolvido por Bekaert et al. (2015). Os autores identificaram mais de 100 deslizamentos e foram capazes de caracterizá-los conforme o seu padrão espacial, a sua taxa de deslocamento, o seu estado de atividade e, também, a sua orientação dentro de uma área de aproximadamente 4000 km<sup>2</sup>.

Dumka et al. (2021) empregaram a técnica PSInSAR™ em um conjunto de dados Sentinel-1A (2016-2019) sobre a região oeste da cidade de *Narmada*- Índia, sendo que os resultados obtidos nesse processamento foram comparados com a série temporal gerada por observações GNSS (2009-2019). O processamento PSInSAR™ foi efetivado no programa SARPROZ e os dados GNSS no programa GAMIT-GLOBK/GLORG – mais detalhes desse programa podem ser encontrados em Herring et al. (2018). Os resultados interferométricos revelaram um deslocamento cumulativo em LoS menor que 2,0 mm/ano. Já os resultados combinados entre o GNSS e a PSInSAR™ revelaram uma taxa de deslocamento menor que 0,5 mm/ano.

Kothyari et al. (2021) realizaram um estudo na região de Ganga – Himalaia, onde processaram 119 imagens SLC-SAR da missão Sentinel-1 (2017-2021) com a técnica PSInSAR™. Como resultado, obtiveram uma taxa de deslocamento média em LoS de  $\pm 11$  mm/ano e, na bacia hidrográfica do *Rio Raunthi* foi constatado subsidências e elevações de aproximadamente 8 mm/ano e 10 mm/ano, respectivamente

Long, Anh e Luyen (2021) usaram 24 imagens SLC-SAR Sentinel-1B para determinar a subsidência de terra nas pedreiras de *Tan My-Thuong* situada na província de *Binh Duong*-Vietnã. Os resultados foram comparados com a subsidência média anual de 20 pontos com observações GNSS, onde obtiveram um coeficiente

de correlação entre as subsidências maior que 0,8, indicando assim a viabilidade na aplicação dos dados SLC-SAR Sentinel-1 para processamentos interferométricos visando determinar deslocamentos induzidos por atividades de mineração.

### 2.1.2.1 Considerações Gerais sobre as Pesquisas Internacionais

Como observado nas pesquisas descritas na seção anterior, foi constatado que os resultados obtidos por meio da aplicação da técnica PSInSAR™ alcançaram uma precisão no nível milimétrico. No entanto, algumas questões foram identificadas. Por exemplo, há dificuldades em validar os resultados provenientes dessa técnica com outras abordagens, como a utilização de métodos geodésicos. Além disso, o processamento normalmente é executado utilizando pacotes de software pagos, o que pode ser um obstáculo para pesquisadores que não dispõem dos recursos necessários.

Um pesquisador que deseje empregar o processamento interferométrico com uma abordagem multitemporal pode encontrar algumas barreiras, especialmente em relação aos aspectos computacionais. Essa abordagem requer o processamento de um grande volume de imagens, o que demanda o uso de computadores poderosos. Adicionalmente, ao utilizar um pacote de software de acesso gratuito, o usuário pode se deparar com problemas técnicos durante o processamento interferométrico, o que pode comprometer o desempenho do processo.

### 2.1.3 Estudos que Envolveram Observações GNSS para Identificar Subsidências

A Tabela 3 apresenta alguns estudos que envolveram observações GNSS com o intuito de identificar e monitorar o fenômeno de subsidência de solo. Os parágrafos seguintes descrevem os principais resultados obtidos pelos autores.

Tabela 3 - Estudos que Envolveram Observações GNSS para Identificar Subsidências

<b>Autor</b>	<b># Estações</b>	<b>Tempo Observação</b>	<b>Método</b>	<b>Software</b>
De Luna <i>et al.</i> (2021)	4	~9 h	Relativo	Topcon Tools
Cenni <i>et al.</i> (2021)	5	24 h	Relativo	GAMIT/GLOBK
Zhao <i>et al.</i> (2020)	8	24 h	PPP	GipsyX
Wang <i>et al.</i> (2020)	55	24 h	PPP	MIDAS
Andreas <i>et al.</i> (2019)	50	10 h	Relativo	Bernese
Yuwono <i>et al.</i> (2019)	32	6 h	Relativo	-
Choudhury <i>et al.</i> (2018)	-	24 h	Relativo	GAMIT/GLOBK
Sneed e Brandt (2013)	13+20	2,5 a 6,5 h	Relativo	-
Ustun <i>et al.</i> (2010)	6	8 –10 h	Relativo	GAMIT/GLOBK
Abidin <i>et al.</i> (2001)	12	9 – 10 h	Relativo	Bernese

Fonte: O autor (2023).

*Median Interannual Difference Adjusted for Skewness (MIDAS)*

De Luna *et al.* (2021) realizaram experimentos na região metropolitana de Recife – Brasil, onde empregaram quatro estações GNSS, sendo uma desta pertencente à RBMC. Três experimentos foram realizados para avaliar a metodologia mais adequada para o monitoramento de subsidência de solo por meio de receptores GNSS. Dois deles foram realizados nas mesmas condições: sendo utilizadas antenas GNSS instaladas ao nível do solo com diferentes configurações de linhas de base – linha de base curta (~210 m) no experimento 1 e linha de base longa (~10 km) no experimento 2 –. No experimento 3, os receptores GNSS foram instalados em marcos localizados no topo de quatro edifícios. A partir desses experimentos, verificou-se que utilizando a tecnologia GNSS, de acordo com os autores, foi possível detectar a ocorrência de deslocamentos verticais da ordem de 1 cm, em condições livres de obstáculos, e com um tempo de rastreamento de pelo menos duas ou três horas dependendo da linha de base.

Cenni *et al.* (2021) analisaram subsidência na região do *Po River Delta* – Itália usando uma rede geodésica. Os autores integraram observações de estações permanentes pertencentes a uma rede GNSS (medida em 2016 e 2018) com resultados InSAR (de 2014 a 2017), o que permitiu melhorar a cobertura espacial dos dados daquela região. Os resultados mostraram que nas regiões arenosas obteve-se uma taxa de deslocamento de -5 mm/ano e de -10 mm/ano nas estações localizadas ao Leste do Rio. Segundo os autores a causa dessas subsidências se deram principalmente pela compactação do solo rico em materiais orgânicos.

Zhao *et al.* (2020) processaram oito estações GPS com rastreamento contínuo no período de 2010 a 2019 na região de Tianjin – China. Em uma das estações foi constatado uma taxa de subsidência que variou de 1 a 2 mm/ano e, em outra, obteve-se uma variação entre 5 a 2 cm/ano. Segundo os autores, essas variações estariam correlacionadas com os níveis de água subterrânea.

Wang *et al.* (2020) usaram observações ao longo de 13,5 anos de 55 estações GNSS no México, como resultado, obtiveram uma taxa de subsidência de 2 cm/ano na grande maioria das cidades localizadas na região central do México. Na cidade do México, por outro lado, a taxa alcançou um patamar de 27 cm/ano, que foi correlacionada com o aumento das atividades agrícolas e industriais que resultou na extração intensiva de água subterrânea. De acordo com os autores, a precisão RMS (repetibilidade) das posições diárias PPP é de aproximadamente 2 a 4 mm nas direções horizontais e 6 a 8 mm na direção vertical.

Andreas *et al.* (2019) observaram a aceleração da taxa de subsidência na cidade de Semarang – Indonésia. Os autores processaram observações de 50 estações GPS com um rastreamento médio de 10 horas nos anos entre 2008 a 2017. Como resultado, observaram que em 2008 a 2012 havia uma taxa de subsidência linear; e que, nos anos entre 2012 a 2017, notaram uma desaceleração a qual foi correlacionada com a exploração da água subterrânea daquela região.

Choudhury *et al.* (2018) empregaram uma rede GPS de monitoramento contínuo na cidade de Gandhinagar – China, o qual documentou uma taxa de subsidência, no período de 2009-2016, de aproximadamente 5 mm/ano. Segundo os autores, a causa desse fenômeno se deu principalmente pela captação de água subterrânea daquela região.

Sneed e Brandt (2013) processaram observações de 13 estações, instaladas na região sul de Coachella Valley – EUA, no período de 1996 a 2005. Por meio dos resultados alcançados os autores observaram um declínio no solo de 124 a 9 mm  $\pm$  54 mm, onde 9 das 13 estações excederam na incerteza máxima esperada de  $\pm$  54 mm (a um nível de confiança de 95%). Através do processamento de 20 estações no período de 2000 e 2005, foi identificada uma mudança no terreno de -192 a +51 mm  $\pm$  36 mm, onde 6 das 20 estações não atenderam o limite esperado de  $\pm$  36 mm. E, resultados advindos do processamento InSAR de cenas das missões ENVISAT e ERS-1/2, adquiridas no período de 2003 a 2005, indicaram uma subsidência no terreno de 75 a 180 mm, o que equivale de 3 a 6 mm/mês.

Ustun *et al.* (2010) processaram observações de seis estações GPS durante o período de 2006-2009, o objetivo se enquadrava no monitoramento de subsidência de terrenos na região de Konya - Turquia. Como resultado, os autores identificaram deslocamentos verticais que variavam de -12 a -52 mm/ano. Esses deslocamentos, no entanto, se deram principalmente nas áreas onde a água subterrânea é amplamente utilizada para irrigação ou uso doméstico.

Abidin *et al.* (2001) processaram observações de 12 estações GPS materializadas na cidade de Jakarta – Indonésia. Foram realizadas cinco campanhas GPS, sendo três no ano de 1997 e duas em 1999 e; três nivelamentos, durante os anos de 1982, 1991 e 1997. Resultados advindos das observações GPS, indicaram uma subsidência de 20 cm durante o período de 1997–1999. Por meio do nivelamento, os autores verificaram uma subsidência de aproximadamente 80 cm durante o período de 1982-1991, e 160 cm durante o período 1991-1997. Através da comparação com

os dados hidrológicos, foi constatado que a subsidência poderia estar relacionada à extração excessiva de água subterrânea daquela região.

## 2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesse capítulo são abordados temas envolvidos nessa pesquisa. Apresentam-se inicialmente um conceito teórico do radar de abertura sintética, uma introdução à MT-InSAR a qual inclui a PSInSAR™, o uso de satélites geodésicos para análise e monitoramento de subsidências e, por fim, uma breve explanação sobre movimentos de massa.

Parte da literatura desenvolvida neste capítulo está apresentada no artigo “*Técnica PSInSAR™ na Avaliação de Deslocamentos: Análise Conceitual, Aplicações e Perspectivas*”, publicada na Revista Brasileira de Cartografia (vol. 75, 2023), podendo ser acessada a partir do endereço *online*: <https://doi.org/10.14393/rbcv75n0a-66102> (Anexo I – Resumo Artigo 1).

### 2.2.1 Radar de Abertura Sintética

O *Radio Detection and Ranging* (RADAR) de Abertura Sintética (do inglês *Synthetic Aperture Radar - SAR*) é um sistema composto por sensores ativos que são capazes de gerar sua própria energia eletromagnética na faixa das micro-ondas. A concepção de abertura sintética foi idealizada no ano de 1951 pelo engenheiro Carl Wiley na empresa *Goodyear Aircraft Cooperation*, onde, através das suas observações, foi constatado que existia uma correlação direta entre a coordenada do objeto refletor com o deslocamento instantâneo do sinal. Carl Wiley denominou essa descoberta de *Doppler beam-sharpening*, conhecida, também, como abertura sintética do sinal ecoado (WILEY, 1954; CURLANDER e MCDONOUGH, 1991; LASSWELL, 2005; FLORES-ANDERSON *et al.*, 2019).

Até então os satélites operavam com um sistema de Radar de Abertura Real (do inglês *Real Aperture Radar - RAR*). Este sistema era composto por uma antena de tamanho físico fixo e, de acordo com Kanevsky (2009), a resolução espacial dos dados mensurados tinha uma relação direta com o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e o tamanho da antena. Em outras palavras, caso um satélite operando na banda-C com um comprimento de onda entre 3,75 a 7,5 cm, e.g. satélite Sentinel 1A/B, realizasse

medições a uma distância (R) de 1000 km do alvo e almejasse obter uma resolução espacial dos dados de aproximadamente 10 m ( $(\lambda/D) \times R = 10$ ) seria necessária uma antena de 375 m de diâmetro (D), no mínimo. No entanto, colocar um satélite no espaço com uma antena com essa dimensão, tornar-se-ia uma missão árdua de ser cumprida. Nesse sentido, para contornar este problema e, ao mesmo tempo, garantir uma melhor resolução espacial dos dados, os pesquisadores optaram pela aplicação do conceito de abertura sintética postulado por Carl Wiley. A solução se deu com a utilização do sistema de abertura sintética instalado em uma plataforma em movimento – que por meio dos conceitos do efeito Doppler e sendo capaz de visualizar um mesmo ponto por diferentes ângulos de visada – simularia uma abertura virtual com uma dimensão maior do que a de uma antena RAR (MOREIRA et al., 2013).

O primeiro projeto com a tecnologia SAR para aplicações civis ocorreu em 1978, que resultou no desenvolvimento e lançamento do satélite SeaSat. Esse satélite foi colocado em órbita no dia 26 de junho de 1978, porém, conseguiu enviar informações por apenas três meses – até o dia 08 de outubro de 1978. Mesmo assim, foi uma missão promissora para o desenvolvimento de inúmeras outras missões SAR, demonstrando amplamente o potencial dessa tecnologia para o sensoriamento remoto do ambiente terrestre (FERRO-FAMIL e POTTIER, 2016). Em 1991, a *European*

Tabela 4 - Missões com SAR

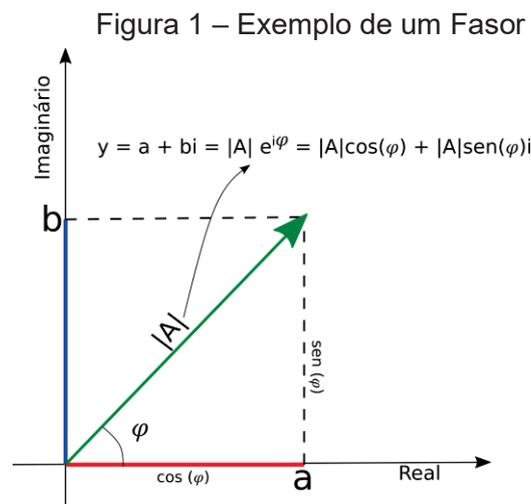
Missão	Operação	Banda	Res. Esp. (m)	Acesso
SeaSat	26/06/1978-08/10/1978	L	25x25	Livre Acesso
ERS-1/2	1991-2000/1995-2011	C	10x30	Solicitação
JERS-1	1992-1998	L	18x18	Solicitação
Radarsat-1	1995 - 2013	C	10x100	Solicitação/Comercial
SRTM	11 a 22/02/2000	C e X	1 e 3 arc-s	Solicitação
ENVISAT/ASAR	2002-2012	C	30x150	Solicitação
ALOS/PALSAR	2006-2011	L	100	Livre Acesso
TerraSAR-X/ TanDEM-X	15/06/2007/21/06/2010	X	16	Solicitação
Radarsat-2	14/12/2007	C	1x3	Solicitação/Comercial
COSMO-SkyMed-1/4	2007/2007/2007/20082010 -	X	3x15	Comercial
RISAT-1	26/04/2012 -	C	1x50	Solicitação/Comercial
HJ-1C	2012 - 2017	S	20	
Kompsat-5	22/08/2013 -	X	20	
PAZ	2014 -	X	16x6	Comercial
ALOS-2	24/05/2014 -	L	100	
Sentinel-1A/1B	03/04/2014 - 25/04/2016 -	C	5x20	Livre Acesso
SAOCOM-1/2	08/10/2018 - 30/08/2020 -	L	100x100	
NISAR	Previsão para 2024	L e S	3x10	Livre Acesso
SWOT	Lançado em 2022	X	-	Livre Acesso
BIOMASS	Previsão para 2024	P	60x50	Livre Acesso
TanDEM-L	Previsão para 2024	L	12x12	Livre Acesso

Fonte: O autor (2023).

Space Agency (ESA) lançou o ERS-1 com o propósito de monitoramento ambiental, posteriormente outras missões foram lançadas como pode ser visto na Tabela 4.

Todos os satélites SAR possuem uma órbita quase-polar, heliossíncrona, a uma altitude que varia de 500 a 800 km. Normalmente utilizam radares com comprimentos de onda mais longos na escala do centímetro ao metro, o que lhes conferem propriedades especiais, como a capacidade de ver através das nuvens, condições climáticas adversas e neblinas (KANEVSKY, 2009; TREVETT, 1986).

Uma imagem SAR é formada por pixels que são associados a uma determinada área na superfície terrestre. No geral, cada pixel fornece informações – as quais são expressas por um fasor – de amplitude e de fase do sinal retroespalhado de todos dispersores presentes dentro da célula de resolução correspondente (FERRETTI *et al.*, 2007). Um fasor representa uma função senoidal, a qual, no entanto, é composta por uma amplitude ( $A$ ), frequência ( $f$ ) e fase ( $\varphi$ ) – a Figura 1 esquematiza um fasor no plano de *Argand-Gauss*.



Fonte: O autor (2023).

Observa-se que o arco formado entre o eixo Real e o vetor da Amplitude representa a fase do pixel e, para obtê-la, basta calcular o argumento de  $A$ . Ou seja, dado um valor complexo  $y = a + bi$  (forma retangular) ou  $y = |A|[\cos(\varphi) + \text{sen}(\varphi)i] = |A|e^{i\varphi}$  (forma polar e forma exponencial) o argumento de  $A$  é dado por  $\arg(A) = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) = \varphi$ , com  $i = \sqrt{-1}$ . Esse cálculo será importante mais adiante quando a fase diferencial de um interferograma for determinada.

### 2.2.2 Tipos de Bandas e a Capacidade de Penetração

Os diferentes comprimentos de onda são ordenados em bandas, as quais são designadas por janelas e são representadas pelas letras Ka, K, Ku, X, C, S, L e P. Cada janela, no entanto, opera em uma determinada frequência e/ou comprimento de onda e pode ser classificada, conforme Moreira *et al.* (2013), de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação das Bandas e suas Frequências e Comprimento de Onda

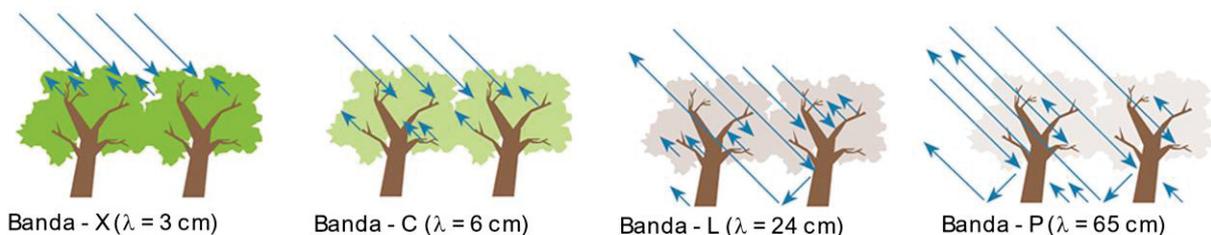
Banda	Frequência - f (GHz)	Comprimento de Onda - $\lambda$ (cm)
Ka	40 – 25	0,75 – 1,2
K	25 – 17,6	1,2 – 1,7
Ku	17,6 – 12	1,7 – 2,5
X	12 – 7,5	2,5 – 4
C	7,5 – 3,75	4 – 8
S	3,75 – 2	8 – 15
L	2 – 1	15 – 30
P	0,5 – 0,25	60 – 120

Fonte: Adaptada de Moreira *et al.* (2013)

Uma característica crucial de cada comprimento de onda é a sua interação com um objeto específico que possui uma propriedade dielétrica particular. Essa propriedade dita como o sinal de micro-ondas de um determinado comprimento de onda interage com uma determinada superfície. Essa interação se reflete na capacidade de espalhamento, de penetração e da absorção do sinal e isso, depende ainda da umidade, da densidade (e.g. vegetação), bem como do comprimento de onda (PARADELLA *et al.*, 2021).

No contexto da capacidade de interação e penetração do sinal de micro-ondas em áreas de vegetação, pode-se dizer que sinais com comprimento de onda menores, como apresentado na Figura 2, interagem mais na parte do dossel da floresta. Por outro lado, para comprimentos de onda mais longos a interação ocorre em camadas mais inferiores, podendo interagir com o solo ou mesmo com o subsolo.

Figura 2 - Capacidade de Penetração do Sinal conforme o  $\lambda$



Fonte: Adaptada de Herndon *et al.* (2020)

No geral, cada banda tem a sua aplicabilidade: a banda-Ka, por exemplo, é bastante empregada em equipamentos para vigilância de aeroportos (MELEZHNIK *et al.*, 2011, 2008) e, também, em algumas missões de satélites altimétricos (PHALIPPOU *et al.*, 1999; SCHWATKE *et al.*, 2015). Assim como a banda-Ka, a banda-Ku também é muito utilizada em satélites altimétricos, pois apresenta baixa interação com o vapor d'água (SCHWATKE *et al.*, 2015). A banda-K é raramente usada em SAR, mas tem aplicação, por exemplo, em sensores para monitoramento e segurança portuária (KEZIAH e MUTHUKUMARAN, 2016).

As demais bandas são comumente vistas nas missões SAR, fato este observado na Tabela 4. A banda-X é de alta resolução e tem pouca capacidade de penetração no dossel das árvores. Essa alta resolução se dá pelo fato de usar comprimento de ondas pequenos (e.g. bandas X e C), conforme aponta Paradella *et al.* (2021), tendem a ser mais sensíveis à pequenas variações de rugosidade, enquanto comprimento de ondas maiores (bandas P e L) tendem a ver esses alvos como lisos. Com isso, a aplicação dessa banda normalmente é voltada para identificação de alvos (DUPUIS e MARTINEAU, 2014); monitoramentos de subsidência e pavimentação (KARIMZADEH e MATSUOKA, 2020; WEMPEN e MCCARTER, 2017); geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) (LANARI *et al.*, 1996) e; estudos em regiões cobertas de neve (DOZIER e SHI, 2000; FIFY *et al.*, 1995; SHI e DOZIER, 1997).

Sinais da banda-C tem um comportamento similar aos sinais da banda-X, no entanto, conseguem uma maior penetração no dossel de uma floresta, porém, não tanto quanto ao sinal das bandas-L e P (Figura 2). A banda-C é usada para mapeamento global principalmente na agricultura (NICOLAU *et al.*, 2021; DOMENECH *et al.*, 2020; PEREIRA *et al.*, 2019; SANO *et al.*, 1999); detecção de movimentos de massas, interferometria (RUIZ-ARMENTEROS *et al.*, 2018; SOUSA *et al.*, 2016); geleiras e áreas com cobertura de neve (DAS e CHAKRABORTY, 2019; HUANG *et al.*, 2013). A banda-S é pouca usada em missões SAR, mas tem aplicações em observações da Terra e monitoramento na agricultura e áreas de florestas (NINGTHOUJAM e BALZTER *et al.*, 2016; NINGTHOUJAM, TANSEY *et al.*, 2016) e na polarimetria (NATALE *et al.*, 2011).

Sinais da banda-L, banda de média resolução, são usados para gerar MDT (RODRIGUES *et al.*, 2011); mapeamento de biomassas (DOMINGUES *et al.*, 2020; MERMOZ *et al.*, 2015; TANASE *et al.*, 2014); mapeamento de uso do solo,

desflorestamento e mapeamento de minerais (GUERRA *et al.*, 2010; MORAIS *et al.*, 2011; PAVANELLI *et al.*, 2018; DA SILVA NARVAES *et al.*, 2010) e; interferometria (CHEN *et al.*, 2012; DAMMANN *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2010). E por final, a banda-P é experimental em SAR, mas tem objetivos em mapeamento e avaliação de vegetação (SOJA *et al.*, 2021; ALEMOHAMMAD *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2003).

### 2.2.3 Modo de Aquisição e formação da Imagem SAR

Os sistemas SAR funcionam através da obtenção de dados por meio da transmissão sequencial de pulsos de micro-ondas codificados por uma antena. Essa antena ilumina uma faixa deslocada em relação à trajetória de voo. O eco resultante de cada pulso é capturado durante um intervalo de recepção, ocorrendo entre os eventos de transmissão. Com a acumulação progressiva de vários pulsos, é possível empregar uma técnica de compressão bidimensional por meio de um processo de filtragem. Esse processo atua sobre uma coleção de sinais retroespalhados é denominado SAR devido à criação de uma abertura virtual extensa na direção azimutal. Essa abertura é formada pela combinação coerente dos pulsos de radar coletados enquanto o SAR continua em sua trajetória de voo (OLIVER, 1989; SIMONS e ROSEN, 2015).

Um SAR possui uma geometria de visada lateral, com o feixe de micro-ondas irradiado em um ângulo ortogonal ao vetor de velocidade do sensor, ou seja, na direção da trajetória do satélite. Um plano de imageamento bidimensional, nas dimensões de alcance (range) e azimute, é obtido com o movimento do sensor e a transmissão periódica de pulsos ortogonais à direção de trajetória (PARADELLA *et al.*, 2021).

Apesar de o comprimento físico típico de uma antena SAR ser da ordem de metros, o comprimento da abertura sintetizada pode atingir a ordem de quilômetros. Dado que a imagem for capturada a partir de um ponto de vista inclinado – com o objetivo de evitar ambiguidades entre os lados esquerdo e direito – a imagem de radar sofre distorções geométricas em relação às coordenadas terrestres. Essas distorções são causadas, como descreve Paradella *et al.* (2021), pela elevação do alvo e aumentam em direção à antena. Para mais informações sobre imagens SAR, consulte Oliver (1989), Massonnet *et al.* (1993), Franceschetti e Lanari (1999), Rosen *et al.* (2000) e Simons e Rosen (2015).

As informações sobre o modo de aquisição e a formação da imagem SAR dos satélites Sentinel-1 estão disponíveis no item 4.1.

### 2.3 INTRODUÇÃO A ABORDAGEM MT-INSAR

De acordo com Hanssen (2001), uma imagem SAR é formada por uma grade regular com valores complexos (SLC) que podem ser decompostos em fases e amplitudes. O processo matemático entre duas imagens SLC-SAR permite a determinação da fase interferométrica, processo este conhecido como Interferometria SAR (InSAR). Graham (1974) foi o primeiro a empregar a técnica InSAR para gerar um MDE. Este modelo, no entanto, continha informações topográficas do terreno, bem como, informações de deformação desta superfície. Nesse sentido, em 1989 Gabriel *et al.* (1989) utilizaram a InSAR para medir a deformação de um terreno no Vale Imperial – Califórnia, por meio de imagens SLC-SAR da missão SeaSat. No intuito de separar a fase de deformação do terreno da fase do terreno, Gabriel *et al.* (1989) empregaram a técnica DInSAR e, assim, obtiveram a fase de deformação na época em que as imagens SLC-SAR foram adquiridas.

Em busca de uma análise da deformação ao longo do tempo, a DInSAR passou a usar um conjunto de imagens SLC-SAR e, em consequência disso, criou-se uma nova técnica que ficou conhecida como MT-InSAR. A MT-InSAR, de acordo com Crosetto e Crippa (2005), usa uma pilha de imagens SAR para gerar uma pilha de interferogramas fornecendo uma descrição completa da deformação ao longo do tempo e, além disso, permite análises estatísticas das observações DInSAR corroborando na solução e estimativa de diferentes parâmetros que afetam na coerência dos *pixels* (e.g. efeito da atmosfera, variação temporal na posição elementar dos objetos na superfície imageada, alinhamento e interpolação das imagens etc.).

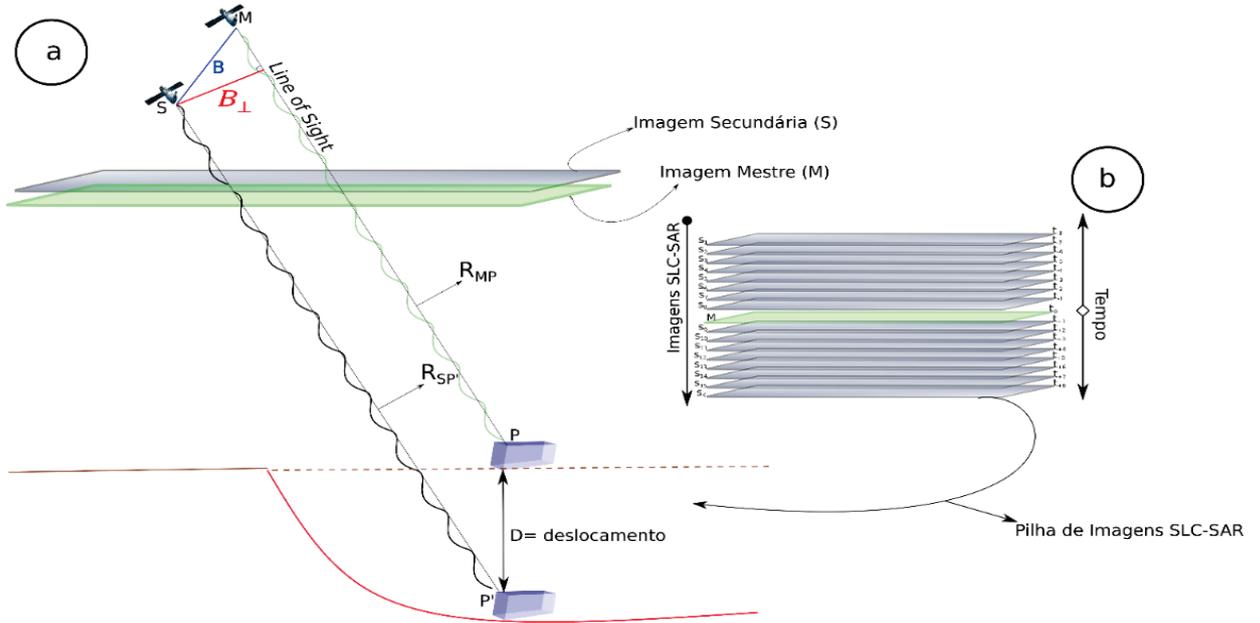
A abordagem MT-InSAR varia conforme o critério usado na seleção do *pixel*: ao considerar a coerência interferométrica e o conceito de linhas bases curtas, tem-se a técnica SBAS – essa técnica considera mais de uma imagem como mestre (BERARDINO *et al.*, 2002). Por outro lado, ao considerar a dispersão de amplitude para seleção de *pixels* estáveis ao longo do tempo e ao usar uma única imagem como mestre para gerar os interferogramas é denominada de PSInSAR™ (NEGRÃO, 2018).

### 2.3.1 Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR™)

Ferretti et al. (2000, 2001) desenvolveram a técnica PSInSAR™ a qual foi pioneira na solução completa para seleccionar *pixels* com Dispersores Persistentes (do inglês *Persistent Scatterer* - PS). Um PS, de acordo com Yhokha et al. (2018), são elementos que apresentam um retroespalhamento estáveis ao longo do tempo (e.g. casas, prédios, pontes, rochas, etc.). A tal técnica, de acordo com Ferretti et al. (2000, 2001) e Berardino et al. (2002), emprega uma pilha de interferogramas diferenciais formados a partir de um conjunto de  $K+1$  imagens SLC-SAR. Essas imagens, contudo, são adquiridas em um intervalo de tempo  $(t_0, t_1, t_2, \dots, t_K)$  sobre uma mesma área de estudo e devem estar devidamente corregistradas (processo que visa realizar o alinhamento entre as imagens SAR e ocorre, de acordo com Li e Bethel (2008), em duas etapas: corregistro grosso com um nível de acurácia de um a dois *pixels* e; corregistro fino, com acurácia a um nível *subpixel*).

A técnica PSInSAR™, como Ferretti et al. (2007) apontam, utiliza uma multiplicação cruzada, *pixel a pixel*, entre duas imagens SLC-SAR para gerar a fase diferencial. Nesse processo, uma imagem SLC-SAR é seleccionada como mestre (M) e a outra é denominada de escrava – aqui está sendo definida como secundária (S). Em síntese, a Figura 3(a) apresenta um esquema de aquisição de duas imagens SLC-SAR sobre uma mesma área de observação, onde é possível identificar a linha-base (B) e a linha-base perpendicular  $B_{\perp}$  formadas entre as duas aquisições. Por outro lado, a Figura 3(b) apresenta uma pilha de imagens SLC-SAR obtidas em um intervalo de tempo  $(t_0, t_1, t_2, \dots, t_K)$  onde uma destas é seleccionada como mestre e as demais são admitidas como secundárias e, assim, formam-se os pares interferométricos.

Figura 3 - Representação Geométrica da Aquisição de Imagens SLC-SAR.



Fonte: Adaptada de Crosetto et al. (2016).

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

Como a técnica DInSAR usa apenas duas imagens SLC-SAR, fica a critério do usuário definir qual imagem será considerada como mestre. Entretanto, ao usar um conjunto de imagens SLC-SAR torna-se uma tarefa difícil a definição de uma imagem ideal a ser considerada como mestre. Nesse sentido, para selecioná-la, Hooper et al. (2007) e Liu et al. (2008) utilizaram o critério de maximização da coerência entre a linha de base temporal, a linha de base perpendicular e a frequência do Doppler em todas as imagens SLC-SAR. Esse critério permite um alinhamento mais preciso das linhas entre as imagens, resultando em um registro mais preciso e, conseqüentemente, uma maior coerência. Dessa forma, é possível calcular essa coerência utilizando a Eq. (1).

$$\gamma^M = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^k g(B_{\perp}^{k,M}, B_C) \cdot g(T^{k,M}, T_C) \cdot g(f_{DC}^{k,M}, f_C) \quad (1)$$

sendo a função  $g$  representada pela Eq. (2)

$$g(x, c) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{c} & |x| < c \\ 0 & |x| \geq c \end{cases} \quad (2)$$

onde  $B_{\perp}^{k,M}$ ,  $T^{k,M}$ ,  $f_{DC}^{k,M}$  e  $k$  são a linha de base espacial perpendicular, a linha de base temporal, a frequência do centroide *doppler* entre as imagens S e a imagem M e o conjunto de imagens SAR, respectivamente;  $c$  representa os valores críticos para a  $B_C$ ,  $T_C$  e o  $f_C$  e; o índice  $g$  é a função coerência.

Uma vez selecionada a imagem M, os pares interferométricos – que consistem em uma imagem M e uma imagem S – podem ser gerados. A multiplicação, de acordo com Massonnet et al. (1994), Rosen et al. (1999) e Ferretti et al. (2007), é feita entre duas imagens SLC-SAR, onde uma desta usa-se o seu conjugado –conjugado da imagem S. A Eq. (3) apresenta a formulação matemática dessa multiplicação cruzada:

$$M(R_{MP})\overline{S(R_{SP})} = A(R_{MP})e^{-\varphi_M j}A(R_{SP})e^{\varphi_S j} = A(R_{MP})A(R_{SP})e^{[-\varphi_M + \varphi_S]j} \quad (3)$$

com  $M(R_{MP})$  e  $S(R_{SP})$  informações complexas das imagens M e S, respectivamente, obtidas a uma distância  $R$  entre o sensor SAR e o alvo  $P$ ;  $\overline{S(R_{SP})}$  o conjugado da imagem complexa  $S(R_{SP})$ ;  $A(R_{MP})$  e  $A(R_{SP})$  a amplitude do sinal retroespalhado da imagem M e S, respectivamente; e  $j = \sqrt{-1}$ .

O argumento da Eq. (3) permite identificar a fase diferencial interferométrica ( $\Delta\varphi_{Int}$ ) e, com isso, obtém-se a Eq. (4).

$$\Delta\varphi_{Int} = \arctan \left\{ \frac{I[M(R_{MP})\overline{S(R_{SP})}]}{\mathcal{R}[M(R_{MP})\overline{S(R_{SP})}]} \right\} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{R_{SP} - R_{MP}}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \varphi_{restr_S} - \varphi_{restr_M} \quad (4)$$

com  $I[S(R_{MP})\overline{S(R_{SP})}]$  sendo a parte imaginária e  $\mathcal{R}[S(R_{MP})\overline{S(R_{SP})}]$  a parte imaginária e real do número complexo;  $2\pi$  um ciclo inteiro da fase;  $\frac{R_{SP} - R_{MP}}{\frac{\lambda}{4\pi}}$  é a fase topográfica ( $\varphi_{topo}$ ), sendo  $\lambda$  o comprimento de onda do satélite e;  $\varphi_{restr_S}$  e  $\varphi_{restr_M}$  as fases do sinal restroespalhado do objeto  $P$  na imagem M e S, respectivamente.

Supondo que o ponto  $P$  sofra um deslocamento para a posição  $P'$  – deslocamento do objeto na imagem S em relação a sua posição na imagem M (vide Figura 3a), – é possível transcrever a Eq. (4), conforme Crosetto et al. (2016), para a Eq. (5).

$$\Delta\varphi_{Int} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{R_{SP} - R_{MP}}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \frac{R_{SP'} - R_{MP}}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \varphi_{restr_S} - \varphi_{restr_M} \quad (5)$$

sendo  $\frac{R_{SP'} - R_{MP}}{\frac{\lambda}{4\pi}}$  a fase do deslocamento ( $\varphi_{desl}$ ) do objeto da posição  $P$  para  $P'$  na direção da linha de vista do satélite (*Line-of-Sight* – LoS, Figura 3a); os termos

$\varphi_{restr_S}$  e  $\varphi_{restr_M}$ , de acordo com Crosetto et al. (2016), se cancelam por se tratarem de um mesmo dispersor ( $P$ ).

A fase topográfica pode ser simulada ( $\varphi_{topo\_simulada}$ ) e subtraída, caso se tenha um MDE da área em questão, mas, como um MDE não é totalmente acurado, isso corrobora no surgimento de uma fase resíduo do MDE ( $\varphi_{MDE}$ ) como pode ser visto na Eq. (6). A equação em questão, apresenta a fase interferométrica de um *pixel* ( $x$ ) advindo de um interferograma ( $K$ ).

$$\begin{aligned} \varphi_{Int(x,K)} = & \varphi_{desl(x,K)} + \varphi_{MDE(x,K)} + (\varphi_{Atm_S} - \varphi_{Atm_M})_{(x,K)} + (\varphi_{Orbita_S} - \varphi_{Orbita_M})_{(x,K)} + \\ & \varphi_{ruídos(x,K)} + 2n\pi_{(x,K)} \end{aligned} \quad (6)$$

sendo  $\varphi_{MDE(x,K)}$  o resíduo topográfico do *pixel*  $x$  no interferograma  $K$ ;  $\varphi_{Atm_S}$  e  $\varphi_{Atm_M}$  são as fases causadas pela atmosfera na época da aquisição das imagens  $S$  e  $M$ , respectivamente;  $\varphi_{Orbita_S}$  e  $\varphi_{Orbita_M}$  são as fases do erro orbital que não foram devidamente mitigadas, mesmo após a aplicação da órbita precisa; a  $\varphi_{ruídos(x,K)}$  representa o ruído da fase; o termo  $2n\pi_{(x,K)}$  indica um ciclo inteiro da fase ( $2\pi$ ), com  $n$  o número de ciclos inteiros não determinados, conhecido como ambiguidade da fase – a solução dessa ambiguidade torna-se possível por meio do processo de desdobramento da fase o qual, de acordo com Mura (2001) e Crosetto et al. (2016), procura estabelecer os valores desta no intervalo de  $[-\pi, +\pi]$ , ou seja, de 0 a  $2\pi$ .

No geral, a PSInSAR™ usa uma pilha de interferogramas de várias imagens SAR adquiridas na mesma área para selecionar *pixels*, denominados de PS, com baixo ruído de fase (WERNER et al., 2003; TEMPORIM et al., 2017). A determinação do ruído da fase é feita, de acordo com Hooper et al. (2004), por meio da diferença entre a fase interferométrica ( $\varphi_{Int(x,K)}$ ) do *pixel*  $x$  menos a fase média ( $\bar{\varphi}_{Int(x,K)}$ ) de uma região circular próxima a este (Eq. 7).

$$\varphi_{ruídos(x,K)} = \varphi_{Int(x,K)} - \bar{\varphi}_{Int(x,K)} \quad (7)$$

Nessa região (considerando a mesma distância e escala), conforme descreve Hooper et al. (2004), as fases  $\varphi_{desl(x,K)}$ ,  $(\varphi_{Atm_S} - \varphi_{Atm_M})_{(x,K)}$  e  $(\varphi_{Orbita_S} - \varphi_{Orbita_M})_{(x,K)}$  são consideradas espacialmente correlacionadas, enquanto

as fases  $\varphi_{\text{ruídos}(x,K)}$  e  $\varphi_{\text{MDE}(x,K)}$  são acatadas espacialmente não-correlacionadas. Para itens espacialmente não-correlacionados, como o  $\varphi_{\text{ruídos}(x,K)}$  e  $\varphi_{\text{MDE}(x,K)}$ , a fase média dos *pixels*, dentro da área circular selecionada, de acordo com os mesmos autores, considera-se como zero. Nesse sentido, os fatores que contribuem na fase  $\varphi_{\text{ruídos}(x,K)}$ , tal como os erros advindos do corregristo<sup>1</sup> das imagens SAR e ruídos térmicos do sistema SAR são pequenos o suficiente para não afetar a estabilidade da fase do *pixel*. Logo, a única fase capaz de afetar diretamente no ruído da fase são os erros advindos do MDE, como pode ser visto na Eq. (8).

$$\varphi_{\text{ruídos}(x,K)} = \varphi_{\text{Int}(x,K)} - \bar{\varphi}_{\text{Int}(x,K)} \approx \varphi_{\text{MDE}(x,K)} \quad (8)$$

A fase  $\varphi_{\text{MDE}(x,K)}$ , como aponta Hooper et al. (2004), é proporcional à linha base perpendicular do *pixel*  $x$  no interferograma  $K$  gerado entre as imagens  $M$  e  $S$  (Eq. 9).

$$\varphi_{\text{MDE}(x,K)} = B_{\perp(x,K)} \mathcal{F}_{\text{MDE},x} \quad (9)$$

sendo  $B_{\perp(x,K)}$  a linha base perpendicular e  $\mathcal{F}_{\text{MDE},x}$  é a constante de proporcionalidade do *pixel*  $x$  no interferograma  $K$ . Com isso, reescrevendo a Eq. (8), baseando-se na Eq. (9), denota-se a Eq. (10).

$$\varphi_{\text{Int}(x,K)} - \bar{\varphi}_{\text{Int}(x,K)} = B_{\perp(x,K)} \mathcal{F}_{\text{MDE},x} \quad (10)$$

Logo, a determinação da fase  $\varphi_{\text{MDE}(x,K)}$  torna-se um processo simples, pois esta tem uma correlação direta com  $\varphi_{\text{Int}(x,K)}$ ,  $\bar{\varphi}_{\text{Int}(x,K)}$ ,  $B_{\perp(x,K)}$  e  $\mathcal{F}_{\text{MDE},x}$ . De acordo com Hooper et al. (2004), as fases  $\varphi_{\text{Int}(x,K)}$  e  $\bar{\varphi}_{\text{Int}(x,K)}$  podem ser determinadas no próprio interferograma, a  $B_{\perp(x,K)}$  através das órbitas precisas do sistema SAR e a constante  $\mathcal{F}_{\text{MDE},x}$  por meio de um processo iterativo empregando-se o Método de Mínimos Quadrados (MMQ). Assim sendo, pode-se estimar a fase do resíduo topográfico do *pixel*  $x$  no interferograma  $K$  por meio da Eq. (11).

---

<sup>1</sup> O corregristo é o processo de alinhamento entre duas imagens SAR e é realizado, de acordo com Li e Bethel (2008), em duas etapas: corregristo grosso com um nível de acurácia de um a dois pixels da imagem e; corregristo fino, com acurácia a um nível subpixel.

$$\hat{\varphi}_{MDE(x,k)} = B_{\perp(x,K)} \mathcal{F}_{MDE,x} \quad (11)$$

Desse modo, a determinação da estabilidade do *pixel*  $x$  é definida através de sua coerência que é baseada, conforme a Eq. (12), no ruído de sua fase.

$$\gamma_x = \frac{1}{K} \left| \sum_{i=1}^K e^{j(\varphi_{Int(x,K)} - \bar{\varphi}_{Int(x,K)} - \hat{\varphi}_{MDE(x,k)})} \right| \quad (12)$$

com  $\gamma_x$  a coerência do *pixel*  $x$  na pilha de interferogramas e  $K$  o número de interferogramas.

### 2.3.1.1 Seleção dos Pixels Candidatos a PS

No intuito de obter a fase que tenha informações de deslocamento do terreno ( $\varphi_{desl}$ ), apenas *pixels* com um PS são selecionados. Esses, no entanto, proporcionam uma fase com um ruído ( $\varphi_{ruídos(s_{K,M})}$ ) baixo o suficiente para não obstruir o sinal dominante (HOOPER et al., 2004). Nesse sentido, Ferretti, Prati e Rocca (2001) usaram o índice de dispersão da amplitude ( $D_A$ ) do sinal retroespalhado, conforme apresentado na Eq. (13), visando selecionar estes *pixels*, os quais são classificados a *priori* como candidatos a Difusores Persistentes (*Persistent Scatterer Candidate* - PSC).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (13)$$

na qual  $\sigma_A$  e  $\mu_A$  sendo o desvio-padrão e a média da amplitude em um mesmo *pixel* ao longo da série temporal, respectivamente.

A seleção dos PSC baseia-se em um limite para o  $D_A$ . Ferretti, Prati e Rocca (2001) o estabeleceram dentro de um valor teórico de  $\sqrt{(4 - \pi)/\pi} = 0,5227$ . Para Du (2017), valores entre 0,25 e 0,4 são razoáveis para a seleção dos PSC, pois valores menores que isso, corroboram na seleção de *pixels* com baixa coerência da fase, logo, a probabilidade de um PS estar presente nesses *pixels* é praticamente nula.

No geral, a dispersão da amplitude, como afirmam Hooper et al. (2004), funciona muito bem como parâmetro para a escolha de PSC, pois permite a seleção de *pixels* que apresentam dispersores dominantes (e.g. construções de alvenaria

como casas, prédios, pontes ou elementos naturais como pedreiras, solos expostos, rochas, etc.) e que tenham uma relação-sinal-ruído (SNR) alta. Por outro lado, regiões com baixa SNR – e.g. áreas com cobertura de vegetação – a seleção de PS, com base na estabilidade da amplitude, não seria de grande vantagem devido à sobreposição do ruído sobre o sinal dominante, o qual corroboraria na perda de informações essenciais para uma análise *a posteriori*.

Já em posse dos PSC's, a seleção do PS baseia-se na estabilidade da fase de cada PSC. Essa estabilidade, portanto, é calculada empregando-se a coerência de cada *pixel* presente na pilha de interferogramas, vide Eq. (12). A seleção dos PS é estabelecida de uma forma interativa, pois, a princípio, não se sabe a localização exata destes. Uma vez convergido nas estimativas da estabilidade de fase de cada *pixel*, como apontam Sousa et al. (2011), os *pixels* mais prováveis a serem PS são selecionados. Opcionalmente, os *pixels* que se comportam como PS em um determinado conjunto de interferogramas, mas não em todos, podem ser rejeitados.

Uma vez selecionado um PS, a sua fase é corrigida dos erros provenientes do ângulo de visada (HOOPER et al., 2007) e do MDE (Eq. 11). Esse último, no entanto, passa a ser considerado como um erro espacialmente correlacionado (HOOPER et al., 2004). Em seguida, a resolução da ambiguidade da fase é recuperada por meio do processo de desdobramento. Na PSInSAR™, por exemplo, esse processo ocorre nas dimensões de azimute, alcance e tempo, isto é, na dimensão tridimensional (3D). Portanto, o desdobramento 3D, de acordo com Hooper e Zebker (2007), é simulado como se ocorresse na dimensão bidimensional (2D): removendo a diferença de fase do *pixel* na terceira dimensão que se refere à diferença de fase causada pelo intervalo de tempo entre as aquisições da imagem *M* e *S*. A fase de cada *pixel*, no entanto, pode ser obtida por meio do algoritmo *Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping* – SNAPHU (CHEN; ZEBKER, 2000, 2001, 2002).

Mesmo após o processo de desdobramento, a obtenção da fase que traz informações de deslocamento do solo ( $\varphi_{dest(x,K)}$ ), vide Eq. (6), ainda é uma tarefa difícil, pois a fase do interferograma continua com erros remanescentes advindos da fase atmosférica e da órbita. Nesse sentido, a fim de mitigar esses dois erros, os quais são considerados espacialmente correlacionados – erro atmosférico – utiliza-se, de acordo com Ferretti et al. (2001) e Hooper et al. (2004), um filtro passa-alta na

dimensão tempo seguido por um outro passa-baixa no domínio espacial. Os termos de erro espacialmente não-correlacionados, tais como erros residuais do MDE e ruído da fase, são modelados, em geral, como ruídos. Logo, a  $\varphi_{desl(x,K)}$  pode ser extraída da fase do *pixel* no interferograma e assim obter o deslocamento do solo na direção da LoS.

### 2.3.1.2 Pacotes de Programas para Processamento Interferométrico

O algoritmo proposto por Ferretti et al. (2000, 2001) representa a primeira solução completa da técnica PSInSAR™ para selecionar *pixels* com PS. Posteriormente, Hooper e Zebker (2007) e Hooper (2008) apresentaram uma contribuição significativa para tal algoritmo, que resultou no desenvolvimento do pacote de processamento *Stanford Method for Persistent Scatterers* (StaMPS). Em 2011 Ferretti et al. (2011) propuseram uma extensão da PSInSAR™ e desenvolveram a técnica SqueeSAR™, sendo esta uma evolução da PSInSAR™. A diferença entre a PSInSAR™ e a SqueeSAR™ é que esta última usa informações dos PS, bem como o uso dos dispersores *Distributed Scatterers* (DS) para selecionar os *pixels* e, assim, computa a taxa de deslocamento na direção da LoS.

Atualmente existe um número significativo de programas que possibilitam o processamento de imagens SLC-SAR por meio da técnica DInSAR e até a MT-InSAR, que inclui a técnica PSInSAR™. Nesse sentido, a Tabela 6 apresenta alguns pacotes de processamento *open-source* e comerciais, mas nem todos são capazes de realizar processamentos MT-InSAR. Os programas tais como GMTSAR, ISCE, DORIS e SNAP apenas permitem a geração de interferogramas por meio das técnicas InSAR e DInSAR. Por outro lado, pacotes como GIANt, DePSI, MintPy, LiCSBAS e StaMPS admitem a realização de análises no âmbito temporal.

Tabela 6 - Programas para Processamento Interferométrico.

Programa	Pacote	Desenvolvedor ou Companhia
DORIS	<i>Open Source</i>	Kampes (1999) e Kampes; Usai (1999)
ROI_PAC	<i>Open Source</i>	Rosen; Persaud (2000) e Rosen <i>et al.</i> (2004)
StaMPS/MTI	<i>Open Source</i>	Hooper; Zebker (2007) e Hooper (2008)
ISCE	<i>Open Source</i>	Rosen <i>et al.</i> (2012)
GMTSAR	<i>Open Source</i>	Sandwell <i>et al.</i> (2011)
GIAnT	<i>Open Source</i>	Agram <i>et al.</i> (2013)
DePSI	<i>Open Source</i>	Leijen (2014)
LiCSBAS	<i>Open Source</i>	Morishita <i>et al.</i> (2020)
MintPy	<i>Open Source</i>	MintPy (s.d.); Yunjun <i>et al.</i> (2019)
SNAP	<i>Open Source</i>	ESA (s.d.)
GAMMA	Comercial	Werner <i>et al.</i> (2000), Wegnüller <i>et al.</i> (2016)
GEOMATICA	Comercial	Geomatica (2015)
ENVI SARscape	Comercial	Sarmap (2014), L3Harries (2021)
ERDAS IMAGINE	Comercial	Hexagon (2019)
SARPROZ	Comercial	Perissin <i>et al.</i> (2011); Perissin; Wang (2012); Perissin (2015)
DI-APASON	Comercial	Massonnet; Adragna (1997); Mora <i>et al.</i> (2016)

Fonte: O autor (2023).

*Delft object-oriented radar interferometric software (DORIS); Repeat Orbit Interferometry PACKAGE (ROI\_PAC); Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal InSAR (StaMPS); InSAR Scientific Computing Environment (ISCE); Generic Mapping Tools (GMTSAR); Generic InSAR Analysis Toolbox (GIAnT); Delft PS-InSAR (DePSI); Looking inside the Continents from Space (LiCSBAS); Miami INsar Time-series software in PYTHON (MintPy); Sentinel Application Platform (SNAP); Gamma SAR Processor and Interferometry Software (GAMMA); Geomatica InSAR package (GEOMATICA); L3Harris and sarmap SA ENVI SARscape (ENVI SARscape); Hexagon ERDAS IMAGINE Package (ERDAS IMAGINE); SAR PROCESSING tool by periz (SARPROZ); DIAPASON software by CNES/Altamira (DI-APASON).*

European Space Agency (ESA) com o objetivo de disponibilizar ferramentas que permitissem o processamento de dados orbitais advindos das missões Sentinel-1, 2 e 3. O SNAP, usando imagens SLC-SAR do Sentinel-1, permite gerar interferogramas por meio da técnica DInSAR e, por meio de um módulo integrado no programa, consegue-se exportá-los no formato StaMPS.

## 2.4 O GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM - GNSS

O GNSS é um termo empregado atualmente quando se opera com mais de uma constelação de satélites que fornecem serviços de posicionamento, navegação e de tempo em uma base regional ou global. Embora o GPS, sistema pertencente aos Estados Unidos da América, seja o GNSS mais prevalente, outras nações implementaram seus próprios sistemas. O Quadro 1 apresenta os principais sistemas globais existentes com os seus respectivos satélites em plena capacidade operacional (do inglês *Full Operational Capability* - FOC).

Constelação	Cobertura	País de Origem	# Satélites	Mais Informações
GPS	Global	EUA	24	<a href="http://gps.gov/systems/gps/">gps.gov/systems/gps/</a>
BDS	Global	China	22	<a href="http://en.beidou.gov.cn/">en.beidou.gov.cn/</a>
Galileo	Global	Europa	24+	<a href="http://gsc-europa.eu">gsc-europa.eu</a>
GLONASS	Global	Rússia	24+	<a href="http://glonass-iac.ru/en/">glonass-iac.ru/en/</a>
IRNSS	Regional	Índia	7	<a href="http://isro.gov.in/">isro.gov.in/</a>
QZSS	Regional	Japão	7	<a href="http://qzss.go.jp/en/">qzss.go.jp/en/</a>

Fonte: O autor (2023).

*BeiDou Navigation Satellite System (BDS); Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS); Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) / Navigation Indian Constellation (NavIC); Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)*

#### 2.4.1 Métodos de Posicionamento GNSS

O uso do GNSS tem se tornado cada vez mais comum em uma variedade de métodos de posicionamento. Esses métodos podem ser classificados em diferentes categorias, como Posicionamento por Ponto (PP), Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), GNSS diferencial (DGPS) e posicionamento baseado em redes. Além disso, dependendo da dinâmica do objeto em questão, o método de posicionamento pode ser classificado como estático ou cinemático. No caso do posicionamento estático, o objeto está em repouso, podendo ser classificado como estático absoluto ou relativo. Já no caso do posicionamento cinemático, o objeto está em movimento, podendo ser classificado como cinemático absoluto ou relativo.

No método PP ou no PPP, de acordo com Monico (2008), é necessário apenas a utilização de um receptor para realizar o posicionamento. A diferença entre esses dois métodos se dá na utilização das observáveis e na acurácia obtida. O PP usa a pseudodistância derivada do código C/A, presente na portadora L1, a sua acurácia, no entanto, gira em torno de metros; já o PPP utiliza as observáveis ou fase da onda portadora (ou ambas) coletadas por receptores de simples ou dupla frequência, no caso, permite o uso de efemérides precisas e isso corrobora numa melhor acurácia no processamento (Tabela 7). Atualmente, devido ao avanço na determinação das ambiguidades inteiras em poucos minutos, tal método permitiu aos usuários obter precisões no posicionamento a nível centimétrico em tempo real; esse método, que é uma variante do PPP, chama-se de PPP-RT (*PPP Real Time*) ou,

também, por permitir a solução das ambiguidades, de PPP-RTK (KRUEGER *et al.*, 2020).

Tabela 7 - Precisão Esperada para um Levantamento PPP - Estático

Tipo de Receptor	Uma Frequência		Duas Frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
<b>Tempo Rastreio</b>				
Após 1 hora	0,700 m	0,600 m	0,040 m	0,040 m
Após 2 horas	0,330 m	0,330 m	0,017 m	0,018 m
Após 4 horas	0,170 m	0,220 m	0,009 m	0,010 m
Após 6 horas	0,120 m	0,180 m	0,005 m	0,008 m

Fonte: Adaptada de IBGE (2020)

No método relativo pós-processado é necessário que haja dois ou mais receptores. Um deles é denominado de estação incógnita ou itinerante e outro de estação base ou de controle sendo uma ou mais estações escolhidas pelo usuário ou estações integradas ao Sistema de Controle Ativo, podendo ser, neste caso, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). Em síntese, o conceito fundamental do posicionamento relativo, segundo Monico (2008), é o rastreamento simultâneo de dois ou mais receptores de observáveis de pelo menos dois satélites comuns. No posicionamento relativo estático a base tanto quanto o itinerante permanece estáticos em um mesmo local durante todo o levantamento. Normalmente a Dupla Diferença (DD) da fase da onda portadora e/ou da pseudodistância é usada como observável neste tipo de posicionamento. Ao usar as duas observáveis, de acordo com Monico (2008), estas, no entanto, podem proporcionar uma melhor relação sinal ruído a qual corrobora na mitigação de erros sistemáticos envolvidos nas observações originais - erros estes como os dos relógios dos receptores, da atmosfera (troposfera e ionosfera), da relatividade, do atraso das portadoras no hardware, dos resíduos dos erros entre os canais, entre outros.

O DGNSS consegue proporcionar acurácia métrica ou submétrica, isso dependerá do comprimento da linha base. Este método não só melhora a acurácia, mas também a integridade do GPS. As observações normalmente utilizadas em navegação, como aponta Monico (2008), são as pseudodistâncias ou as pseudodistâncias filtradas pela portadora. Conquanto, o DGPS em rede, a acurácia obtida é superior ao DGPS, mas, devido a observável empregada, a acurácia máxima alcançada é na ordem decimétrica (ALVES *et al.*, 2013). Por outro lado, quando o método usa a onda portadora como observável, passa a ser denominado de RTK (do inglês *Real Time Kinematic*). Este, conforme observado na Tabela 8, consegue obter

um nível de acurácia superior ao do DGPS. Contudo, conforme o aumento do comprimento da linha base entre as estações, a degradação da acurácia da estação móvel torna-se um fator inevitável devido à influência de erros sistemáticos (e.g. órbita do satélite, troposfera e ionosfera). Logo, para contornar esse problema, surgiu o conceito do emprego de rede de estações de referência em tempo real denominada de NRTK (do inglês *Network RTK*). Neste caso, os erros sistemáticos atuantes na região da rede passam a ser modelados e incluídos nas informações a serem enviadas às estações móveis localizadas na região de abrangência da rede, melhorando, desse modo, a acurácia do posicionamento e navegação (SEEBER, 2003; KRUEGER *et al.*, 2020).

A Tabela 8, conforme o IBGE (2008), traz um resumo das técnicas de posicionamento mais utilizadas, bem como o tipo de observação e a precisão obtida em cada método.

Tabela 8 - Precisão de Alguns Métodos de Posicionamento

Método		Observações	Precisão
Por Ponto	PP	Pseudodistância	15,3 m
	PPP	Pseudodistância e Fase	0,02 m
	PPP-RTK	Fase	0,1 m
Tempo Real	DGPS	Pseudodistância	0,50 a 3 m
	RTK	Fase	~2,5 cm
Relativo	Estático	DD Pseudodistância e Fase	0,01 a 1 ppm

Fonte: Adaptada de IBGE (2008)

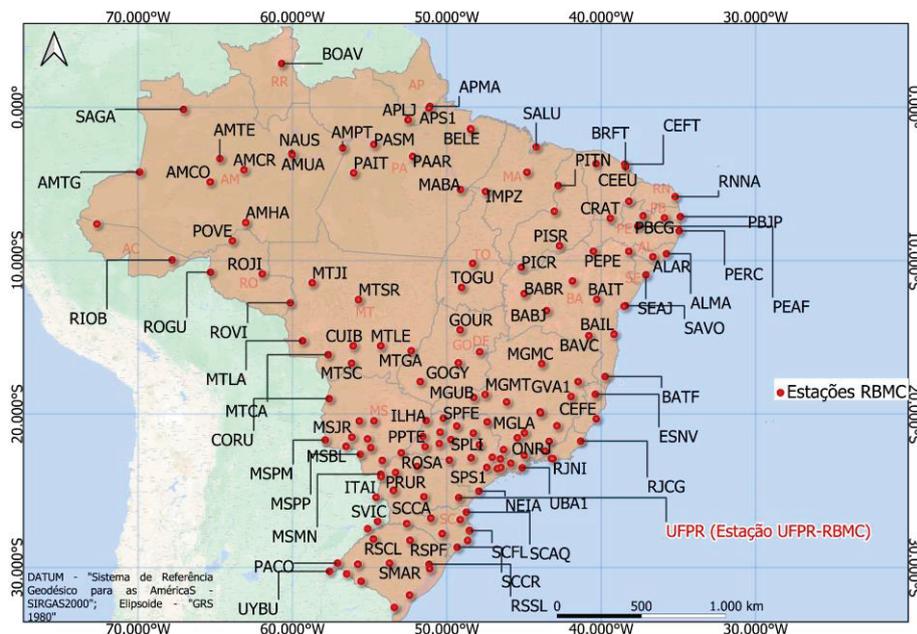
#### 2.4.2 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC)

A RBMC é composta por um conjunto de estações geodésicas ativas, equipadas com receptores GNSS de alto desempenho as quais proporcionam, uma vez por dia ou em tempo real, observações para a determinação de coordenadas. Essas observações são coletadas, armazenadas continuamente e disponibilizadas gratuitamente ao usuário devidamente cadastrado. A rede, no entanto, integra o Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS), a qual tem sua definição idêntica à do Sistema Internacional de Referência Terrestre ITRS (do inglês *International Terrestrial Reference System*), e sua realização é a densificação regional do ITRF (do inglês *International Terrestrial Reference Frame*).

Atualmente a rede, conforme a Figura 4, é composta por um total de 136 estações para pós-processamento (pontos em azul) e em tempo real e 11 estações

somente para pós-processamento (pontos em vermelho) no território brasileiro, sendo que em cada capital, há, pelo menos, uma estação com dados sendo disponibilizados em tempo real e para pós-processamento. As informações geradas pela rede, de acordo com o IBGE (2018), subsidiam a determinação de coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude elipsoidal ou geodésica) com alta precisão – de alguns milímetros –, atendendo as aplicações de projeto, construção e monitoramento de grandes obras de engenharia, como estradas, pontes e barragens, de demarcação de áreas de proteção ambiental, terras indígenas e propriedades rurais.

Figura 4 - Distribuição das Estações GNSS da RBMC no Brasil



Fonte: Adaptada de IBGE (2021c)

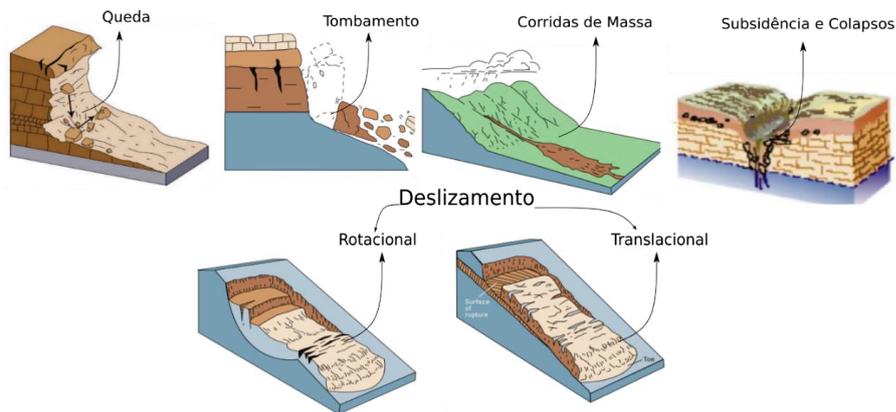
## 2.5 MOVIMENTO DE MASSAS

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008) o movimento de massa – também conhecido como deslizamento, queda de barreiras ou ruptura de barreiras – descreve o movimento descendente do solo, rochas e/ou materiais orgânicos ocasionado pelo efeito da gravidade, que normalmente é potencializado pela ação da água. Estes movimentos, conforme o mesmo autor explana, podem ser classificados em quatro tipos principais: quedas/tombamentos/rolamentos; deslizamentos; corrida de massa e; subsidência e colapsos (Figura 5). Ressalta-se que movimentos abruptos como quedas e/ou corrida de massa não são possíveis de serem identificados pela

técnica PSInSAR™ que, de acordo com Frangioni (2014), movimentos como estes causariam suposição no modelo linear adotado nas abordagens da tal técnica.

À visto disso, a subsidência e os colapsos do solo, como apontam *Vestena et al.* (2002), são decorrentes do grau de dissolução da rocha, caracterizados por afundamento rápido ou gradual do terreno devido ao colapso de cavidades que podem ocorrer mesmo sem sinais prévios denunciadores e, assim, trazer riscos e prejuízos

Figura 5 - Alguns Tipos de Movimento de Massa



Fonte: Adaptada de Highland e Bobrowsky (2008); Teixeira *et al.* (2003).

econômicos e até mesmo perdas de vidas humanas. No Brasil já foram verificados diversos acidentes relacionados, um, por exemplo, de acordo com Oliveira (2010), ocorreu em 1986 na cidade de Cajamar (SP); outros, de menores proporções, foram verificados nas cidades de Sete Lagoas (MG), Colombo e Almirante Tamandaré (PR).

### 2.5.1 Classificação do Movimento de Massa Conforme a sua Velocidade

Há diversos métodos propostos ao longo dos anos para classificar os movimentos de massa, no entanto, o modelo estruturado por Varnes em 1978 é o mais adotado internacionalmente, o qual, de acordo com Cruden e Varnes (1996), estabelece uma escala de movimento conforme o Sistema Internacional de Unidades (S.I.), variando de metro por segundo até o milímetro por ano. Varnes (1958) não discutiu a divisão da escala, todavia, utilizava unidades que variavam de pé por segundo até pé por 5 anos. A Tabela 9 apresenta a classificação de Cruden e Varnes (1996).

Tabela 9 - Escala de Velocidades de Deslizamentos

Classificação do Movimento	Velocidade	Satélite SAR
		Banda-C e Banda-X
Extremamente Lento	< 16 mm/ano	Sim
Muito Lento	0,016 – 1,6 m/ano	Sim
Lento	1,6 m/ano – 1,3 m/mês	Não
Moderado	13 m/mês – 1,8 m/h	Não
Rápido	1,8 m/h – 3 m/min	Não
Muito Rápido	3 m/min – 5 m/s	Não
Extremamente Rápido	> 5 m/s	Não

Fonte: Adaptada de Cruden e Varnes (1996); Frangioni (2014).

Devido à ambiguidade de fase do processamento de dados SAR e parâmetros de aquisição de satélite em todas as bandas C e X, a análise PSInSAR™ do movimento de massa é limitada a fenômenos que variam de ‘extremamente lento’ a ‘muito lento’. A ambiguidade, no entanto, está correlacionada com a natureza ambígua das fases interferométricas. Com isso, a capacidade para identificar movimentos se limita a um quarto do comprimento de onda entre duas aquisições sucessivas de dois PS próximos do mesmo conjunto de dados (HANSSEN, 2005; CROSETTO *et al.*, 2010). Por conseguinte, as velocidades advindas do processamento PSInSAR™ dependem dos comprimentos de onda e do tempo de revisitação do satélite, no entanto, sensores nas bandas C e X, como apresentado na Tabela 9, ficam limitados a algumas classes de velocidade. Mas sensores de banda L, que apresentam um comprimento de onda maior (vide Tabela 5), de acordo com Frangioni (2014), podem medir movimentos com velocidades de até 45 cm/ano.

Os termos de movimento e velocidade identificados por meio dessa técnica podem ser correlacionados através de uma matriz de atividade ou uma escala de intensidade e, assim, definir a sua grandeza de movimento. Essa classificação, no entanto, foi estabelecida por Righini *et al.* (2010, 2012) onde usaram medidas de deformação do solo derivadas do processamento PSInSAR™ de duas missões SAR diferentes: uma usando série histórica do ERS (1992-2001) e outra do ENVISAT (2002-2007). No caso, usaram uma matriz de atividades baseada nas informações provenientes do mapa de inventário pré-existente e na velocidade média anual extraída de um único conjunto de resultados advindos da técnica PSInSAR™.

Contudo, como indica Bianchini *et al.* (2012), a escala de intensidade é baseada apenas na velocidade média da PSInSAR™ e consiste em três classes diferentes: ‘insignificante’, ‘extremamente lento’ e ‘muito lento’ (Quadro 2). Baseando-se na escala de velocidade de Cruden e Varnes (1996), os deslizamentos de terra com suficientes informações de PS também são divididos em duas classes de velocidade: ‘extremamente lento’ e ‘muito lento’, no entanto, deslizamentos caracterizados por velocidade inferior a 2 mm/ano são classificados como ‘insignificantes’.

Quadro 2 - Índice de Intensidade

	Insignificante	Extremamente Lento	Muito Lento
Righini <i>et al.</i> (2010, 2012)	< 2 mm/ano	2 a 10 mm/ano	> 10 mm/ano
Cruden e Varnes (1996)	< 2 mm/ano	2 a 16 mm/ano	16 mm/ano a 1,6 m/ano

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

Nota-se que o limiar que discrimina as classes de movimentos ‘extremamente lento’ e ‘muito lento’ deve ser ajustado ao limiar de 16 mm/ano definido por Cruden e Varnes (1996) (vide Tabela 9) para um valor inferior de 10 mm/ano definido por Righini *et al.* (2010, 2012). Essa diferença ocorre, de acordo com Bianchini *et al.* (2012), devido à subestimação das taxas de deslocamento ao longo da LoS identificadas pela técnica PSInSAR™, que geralmente não estão na mesma direção de deformação do deslizamento no terreno. Além disso, uma subestimação adicional dos movimentos ocorre durante a avaliação das taxas representativas de escorregamento, que são calculadas como velocidades médias, tanto espacialmente (calculando a média das medidas de diferentes PS dentro da mesma área de escorregamento) quanto temporalmente (taxas anuais). Em síntese, o Quadro 3 apresenta a capacidade de diversos métodos para identificar movimentos conforme a sua classe (Tabela 9). No entanto, como indica Martire (2013), a escolha do sistema de monitoramento deve ser adequada para o fenômeno a ser estudado e, além disso, atentar nas questões no ponto de vista técnico e econômico e levar em consideração, também, a capacidade real dos sistemas individuais tal como resolução, precisão, erro, tempo de processamento, dentre outros.

Quadro 3 - Capacidade de Cada Método em Identificar o Movimento.

Classe do Movimento	PSInSAR	DInSAR	(a)	(b)	GNSS	(c)
Extremamente Rápido						
Muito Rápido						
Rápido						
Moderado						
Lento						
Muito Lento						
Extremamente Lento						

Fonte: Adaptado de Martire (2013)

Sendo (a) GBR; (b) Inclínômetros e (c) Técnicas Topográficas.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

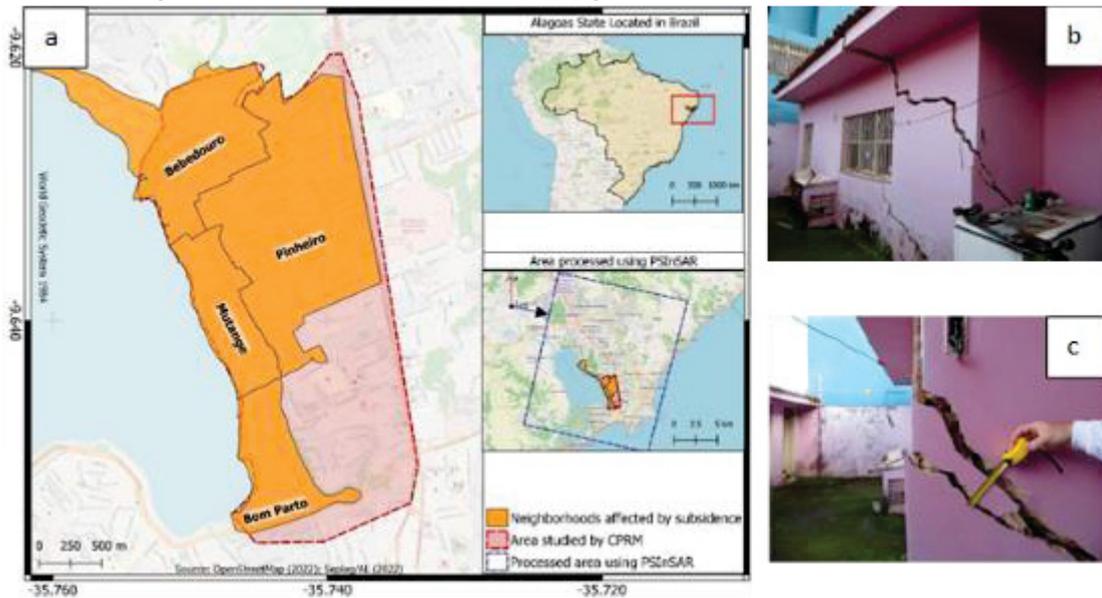
Foram realizados estudos em duas regiões afetadas por processos de subsidência. Na primeira região, localizada em Maceió, a taxa de deslocamento, previamente conhecida, apresentou variações significativas, variando de -187,99 a -72 mm/ano entre 2016 e 2018, e de -235,7 a -100 mm/ano entre 2018 e 2019 (CPRM, 2020). Na segunda região, em Curitiba, foram identificados indícios de um processo de subsidência, conforme demonstrado nos estudos conduzidos por Werlich (2017) e Amagua et al. (2022). Para investigar e quantificar a taxa de deslocamento nessas duas regiões com diferentes velocidades de deslocamento, foi empregada a técnica PSInSAR™.

#### 3.1 MACEIÓ – CIDADE COM HISTÓRICO DE SUBSIDÊNCIA (BAIRRO PINHEIRO)

A cidade de Maceió é a capital do estado costeiro de Alagoas, Brasil - ocupa uma área de 509,5 km<sup>2</sup> e tem uma população de 1.031.597 habitantes distribuídos em 50 bairros (Maceió, 2000; IBGE, 2021). As localidades escolhidas para processamento PSInSAR™ cobrem os bairros mostrados na Figura 6, que incluem Pinheiro, Bebedouro, Bom Parto e Mutange. Nessa região, principalmente no bairro Pinheiro, em 3 de março de 2018, ocorreu um terremoto de magnitude 2,4 (escala brasileira de magnitude local), culminando no aparecimento de fissuras em casas, edifícios e ruas públicas (CPRM, 2019). Assim, um total de 6356 edifícios foram classificados como zonas de risco e colocados para demolição pelas autoridades brasileiras, e os moradores foram realocados em áreas estáveis.

De acordo com Cabral, Santos e Filho (2006), esta área é geologicamente sedimentar, e o bombeamento excessivo de poços reduz a pressão exercida pela água, gerando suporte redistributivo para grãos e subsidência do solo que pode atingir alguns centímetros por ano e se estender por vários quilômetros. Sendo uma área urbana, a cobertura do solo é predominantemente composta por edifícios, casas e estradas, que são bons retrorefletores na banda-C. Na região costeira, os alvos predominantes são arbustos, árvores e solo exposto, que fornecem uma alta decorrelação de retroespalhamento.

Figura 6 – Rachaduras em Construções no Bairro Pinheiro - Maceió



Fonte: O autor (2023).

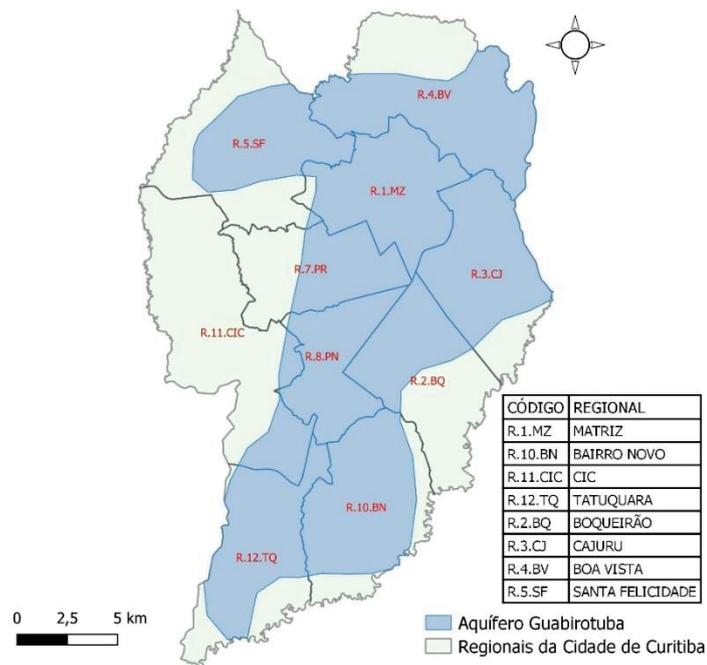
a) Área de Estudo: O bairro de Pinheiro está localizado na cidade de Maceió, capital do Estado de Alagoas (que pertence ao Nordeste do Brasil). b) e c) mostram exemplos de fissuras que ocorreram em casas e edifícios; essas fotos foram tiradas CPRM (2018).

### 3.2 CURITIBA – BAIRRO GUABIROTUBA

A cidade de Curitiba é a capital do Estado do Paraná, situados na Região Sul do Brasil. A cidade tem a sua fundação oficial datada no dia 29 de março de 1693, quando foi criada e estabelecida a sua Câmara Municipal. Atualmente, de acordo com o IBGE (2021b), a sua dimensão abrange uma área de 434,892 km<sup>2</sup> sendo ocupada por uma população de 1.751.907 habitantes (censo 2010), distribuídos em 75 bairros os quais são administrados por 10 regionais (Figura 7): Bairro Novo, Boa Vista, Boqueirão, Cajuru, CIC, Matriz, Pinheirinho, Portão, Santa Felicidade e Tatuquara.

Curitiba se encontra predominantemente sobre o aquífero Guabirotuba (Figura 7), que, de acordo com Rosa Filho *et al.* (2002), é representado por lentes de areias arcoseanas que ocorrem intercaladas nos sedimentos pelíticos da bacia de Curitiba (argilitos e siltitos). Este pacote sedimentar, cuja espessura máxima atinge 80 m, ocupa uma área de aproximadamente 400 km<sup>2</sup> na Região Metropolitana de Curitiba (RMC). Nessa região, em 2002, segundo Mendes *et al.* (2002), encontravam-se em operação cinco poços artesanais visando o abastecimento público do município de Pinhais, sendo que a vazão média de captação alcançava um valor de 18,8 m<sup>3</sup>/h em poços com profundidade média de 54,6 m.

Figura 7 - Representação das Regionais e Aquífero Guabirotuba da Cidade de Curitiba



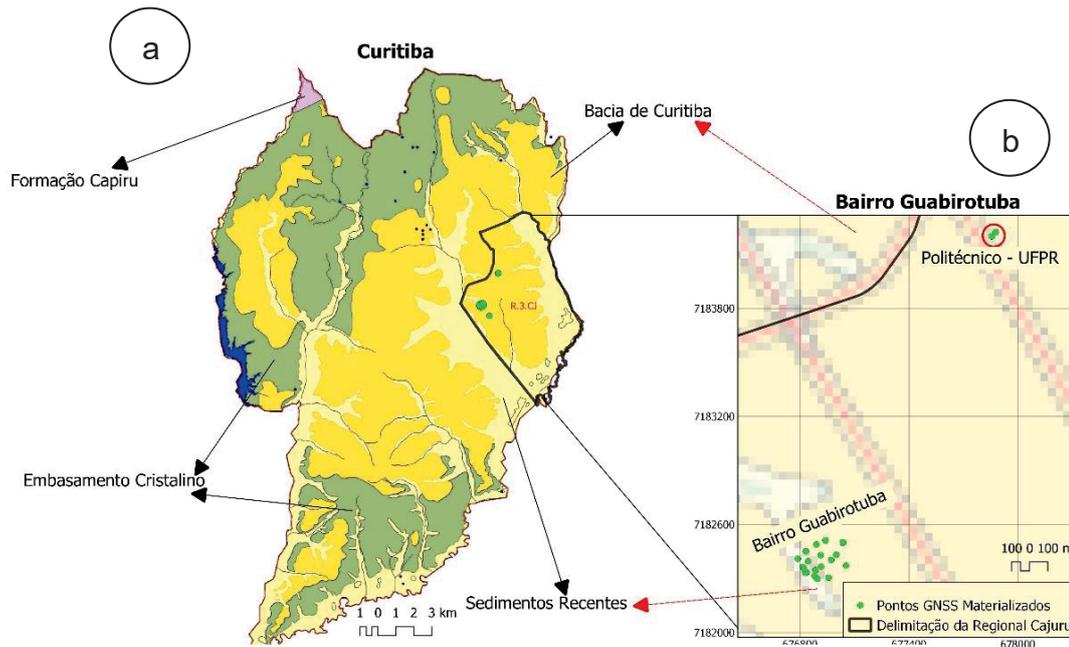
Fonte: Adaptada de SUDERHSA (1998)

No extremo norte da cidade de Curitiba, já extrapolando para os municípios de Almirante Tamandaré, Bocaiúva do Sul, Campo Largo, Campo Magro, Colombo, Itaperuçu e Rio Branco do Sul encontra-se o Aquífero Karst. De acordo com Filho et al. (2000), o aquífero cárstico é representado por mármores calcícticos e dolomíticos que ocorrem em faixas contínuas de extensão lateral de 15 km, associados a filitos e quartzitos numa sequência diferencialmente dobrada da Formação Capiru. Conforme informações obtidas no portal do Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba - SANEPAR (2015), há pelo menos 35 poços sobre o aquífero e, segundo Filho et al. (2000), a vazão média dos poços é de aproximadamente 160.000 L/h, sendo que os valores de capacidade específica variam de 20 L/h/m a 100.000 L/h/m.

### 3.2.1 Aspectos Geológicos da Cidade de Curitiba

A formação geológica de Curitiba é composta basicamente por quatro compartimentos (Figura 8a): Bacia de Curitiba, Formação Capiru, Sedimentos recentes e Embasamento Cristalino (SALAMUNI, 1998).

Figura 8 - Folha Geológica de Curitiba.



Fonte: Adaptada de IAT (2006) e GeoturismoBrasil (2020).

A Bacia de Curitiba, de acordo com Salamuni (1998), é formada geologicamente por distintas unidades lito-estratigráficas que, em parte, é constituída por embasamentos e sedimentos. Sedimentos estes que ocupam, como aponta De Lima *et al.* (2013), uma área de 3.000 km<sup>2</sup> e são compostos basicamente por argilas e areias arcossianas (20 - 40% de feldspato). Essa formação de sedimentos é denominada, também, de Formação Guabirota, a qual, segundo Felipe (2011), corresponde a deposição de sedimentos ocorrida durante um período de 23 a 1,8 milhões de anos, os quais são encontrados na Região Metropolitana e no município de Curitiba, principalmente na Regional Cajuru, mais especificamente no bairro Guabirota (Figura 8b) onde Werlich (2017) materializou pontos de uma rede para monitorar movimentos de massa naquele bairro, por meio de nivelamento e observações GPS.

A formação Capiru, que pertence ao Grupo de Açungui, está inserida dentro do contexto do Sistema Orogênico Ribeira Sul, um grande sistema orogênico do Neoproterozoico, relacionado à amalgamação do Gondwana Oeste (HEILBRON *et al.*, 2008). Essa formação está localizada na região norte, noroeste e oeste da bacia Curitiba, abrangendo o extremo norte da cidade de Curitiba – como pode ser visto na Figura 8a – ocupando regiões do município de Almirante Tamandaré, Bocaúva do Sul e Colombo.

A formação de Sedimentos Recentes aparece em quaisquer das regiões, especialmente nos vales banhados pelos rios e nas outras categorias de depósitos

que não se consolidaram. É formada basicamente por aluviões, argilitos, arcósios, areias, cascalhos e turfeiras. No geral, cobre uma área de 6377 km<sup>2</sup> o que corresponde 3,2% da área do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2001).

O embasamento cristalino da região de Curitiba, de acordo com Giusti (1989), pode ser dividido em um conjunto de gnaisses e os metassedimentos do Grupo Açungui. Sua direção estrutural é predominantemente na região NE-SW, mas tem presença, também, no Sul de Curitiba e nas proximidades dos municípios de Araucária-PR.

### 3.2.2 Rede Materializada no Bairro do Guabirota

O trabalho desenvolvido por Werlich (2017) tinha como objetivo a investigação de estratégias de processamentos de dados GPS com o intuito de monitorar uma área urbana instável. Para alcançar esse objetivo, uma rede GPS foi materializada no bairro do Guabirota, sendo que a autora realizou nove levantamentos GPS e nove nivelamentos geométricos no período de 2014 a 2019.

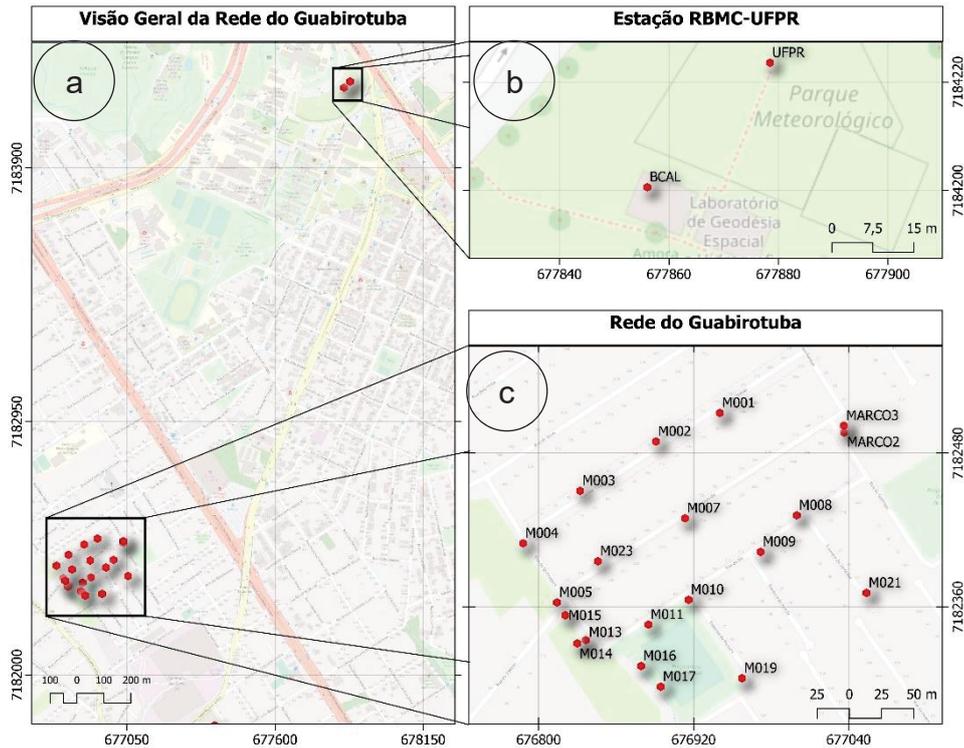
A rede, como apresentado na Figura 9c, é composta por 20 pontos materializados. Sendo dois pontos definidos como Marco (MARCO1 e MARCO2), pois estes foram conectados à Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP)<sup>2</sup> através do transporte da altitude ortométrica. Na época Referência de Nível (RN) empregada encontra-se materializada nas dependências do Campus Jardim das Américas, no Centro Politécnico da UFPR e é denominada de 2053D.

A Figura 9a apresenta a localização da rede em relação ao Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A Figura 9b mostra a estação UFPR pertencente à RBMC (estação UFPR-RBMC); e a estação BCAL usada para calibrar as antenas GNSS. A Figura 9c mostra a distribuição espacial dos pontos materializados no bairro do Guabirota.

---

<sup>2</sup> Conjunto de estações geodésicas, denominadas referências de nível, que materializam a componente altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), a partir de medições de nivelamento geométrico de alta precisão.

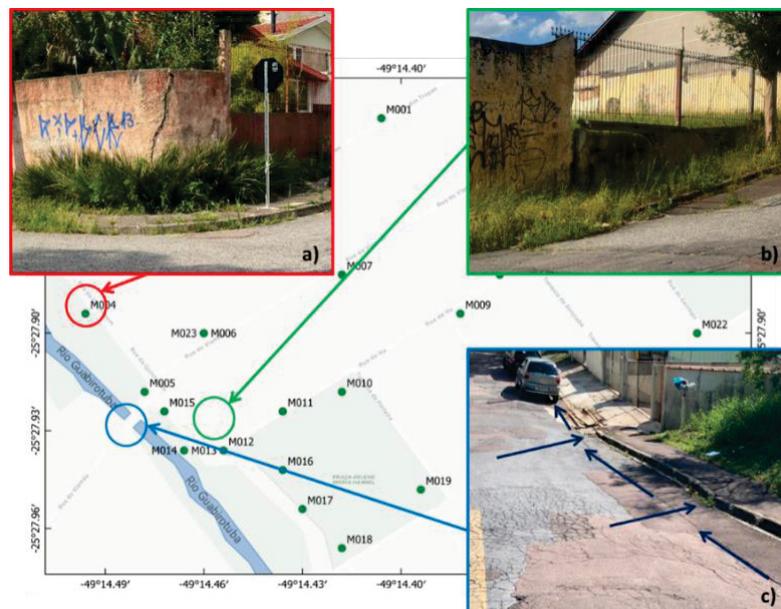
Figura 9 - Rede GPS Materializada no Bairro do Guabirota (Curitiba - PR).



Fonte: Adaptada de Werlich (2017) e OpenStreetMap (2021).

Werlich (2017) identificou pontos em uma área com potencial processo erosivo. Na Figura 10, três pontos importantes da área de estudo são destacados, onde questões viárias e estruturais relacionadas a possíveis processos de subsidências e deslizamentos de terra podem ser observadas. Por exemplo, nas Figura 10a e 10b, é possível ver rachaduras nas paredes de duas casas, provavelmente causadas por subsidência de terra e detritos. A Figura 10c mostra o colapso da estrada que passa sobre o Rio Guabirota.

Figura 10 - Evidência de Processo de Subsidência no Bairro do Guabirota – Curitiba.



Fonte: Adaptada de Amagua et al. (2022).

Werlich (2017) realizou levantamentos GPS empregando-se o método de Posicionamento Relativo Estático, com intervalo de gravação dos dados equivalente a 1 segundo e máscara de elevação de  $0^\circ$ , exceto na primeira campanha, quando o intervalo de gravação dos dados foi de 15 segundos. A nona campanha foi executada no ano de 2019.

O processamento desses dados foi realizado pelos autores Amagua et al. (2022), os quais empregaram o *software* científico *GNSS at MIT (GAMIT) - Global Kalman filter (GLOBK)* (HERRING et al., 2018) que levou em consideração apenas observáveis da constelação GPS. Como resultado, os autores detectaram um deslocamento local da zona sul próxima ao rio Guabirota, provavelmente como resultado de um processo local de subsidências de terra ou da composição geomorfológica da área. Também se observou uma clara descontinuidade na componente vertical da série temporal. Isso provavelmente, segundo os autores, estaria relacionado com a existência de um processo físico local, que, por sua vez, produziu velocidades relativas de vários milímetros por ano na componente vertical de algumas estações.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Os programas utilizados neste estudo foram o SNAP (*ESA's Sentinel Application Platform*), StaMPS (HOOPER et al., 2010), QGIS (*Open Source Geographic Information System*), Google Earth, Matlab® e RStudio.

- i. **SNAP 9.0** – Pré-processamento das imagens SLC-SAR e geração dos interferogramas diferenciais (consulte item 2.3.1.2);
- ii. **StaMPS 4.1** – Processamento empregando a técnica PSInSAR™, que pode ser acessado através do link <https://github.com/dbekaert/StaMPS/releases/tag/v4.1-beta>;
- iii. **QGIS** – Visualização da distribuição espacial dos PS, elaboração de mapas e plotagem das séries temporais;
- iv. **Google Earth** – Visualização dos PS;
- v. **Matlab** – Execução do StaMPS;
- vi. **RStudio** – Visualização e plotagem das séries temporais;

As imagens SLC-SAR utilizadas neste trabalho foram adquiridas no modo descendente pelo satélite Sentinel-1A, uma das principais missões do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA). Essas imagens foram obtidas por meio do portal do projeto Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), que fornece acesso direto aos dados de observação da Terra coletados pela missão. Neste trabalho, as imagens SLC-SAR foram adquiridas com polarização "HH", que se refere à orientação da antena do radar em relação à superfície da Terra. Detalhes abrangentes sobre o modo de aquisição das imagens SAR e a formação das imagens pelo satélite Sentinel-1A podem ser encontrados na seção 4.1.

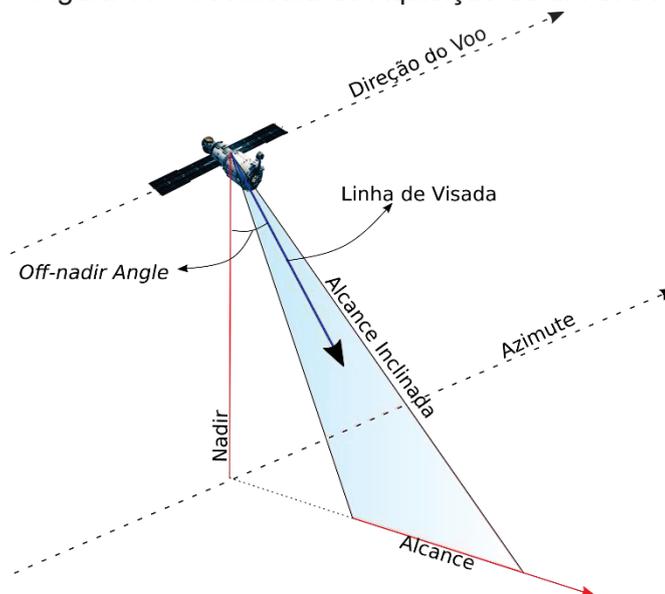
Para remover a fase topográfica presente nos interferogramas, empregou-se o Modelo Digital de Elevação (DEM) da ALOS-PALSAR *Radiometric Terrain Correction* (RTC) com resolução espacial de 12,5 m (RTC1), baixado do site do *Alaska Satellite Facility* (ASF) (<https://search.asf.alaska.edu/#/>).

Os subitens a seguir descrevem as etapas de processamento interferométrico empregando a técnica PSInSAR™. Em seguida, apresenta-se a metodologia empregada no teste realizado para detectar a subsidência em uma área com histórico de subsidência e, por fim, descreve-se a metodologia para a análise de subsidência sobre a área do bairro do Guabiro tuba.

#### 4.1 MODO DE AQUISIÇÃO E FORMAÇÃO DA IMAGEM SAR DOS SATÉLITES SENTINEL-1

Os satélites lançados nas últimas décadas carregam uma antena SAR cuja linha de visada (LoS) apresenta uma inclinação lateral em relação à superfície terrestre. Essa inclinação é conhecida como *off-nadir angle* e varia de  $20^\circ$  a  $50^\circ$ ; nos satélites da constelação Sentinel-1, por exemplo, ela varia de  $29,1^\circ$  a  $46,0^\circ$ . No geral, devido à curvatura da superfície terrestre, o ângulo de incidência no terreno é maior do que *off-nadir angle*, mas, de acordo com Ferretti et al. (2007), por uma questão de simplicidade, assume-se que a superfície de contato é plana e, portanto, o ângulo de incidência é igual ao *off-nadir angle* como apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Geometria de Aquisição de um SAR

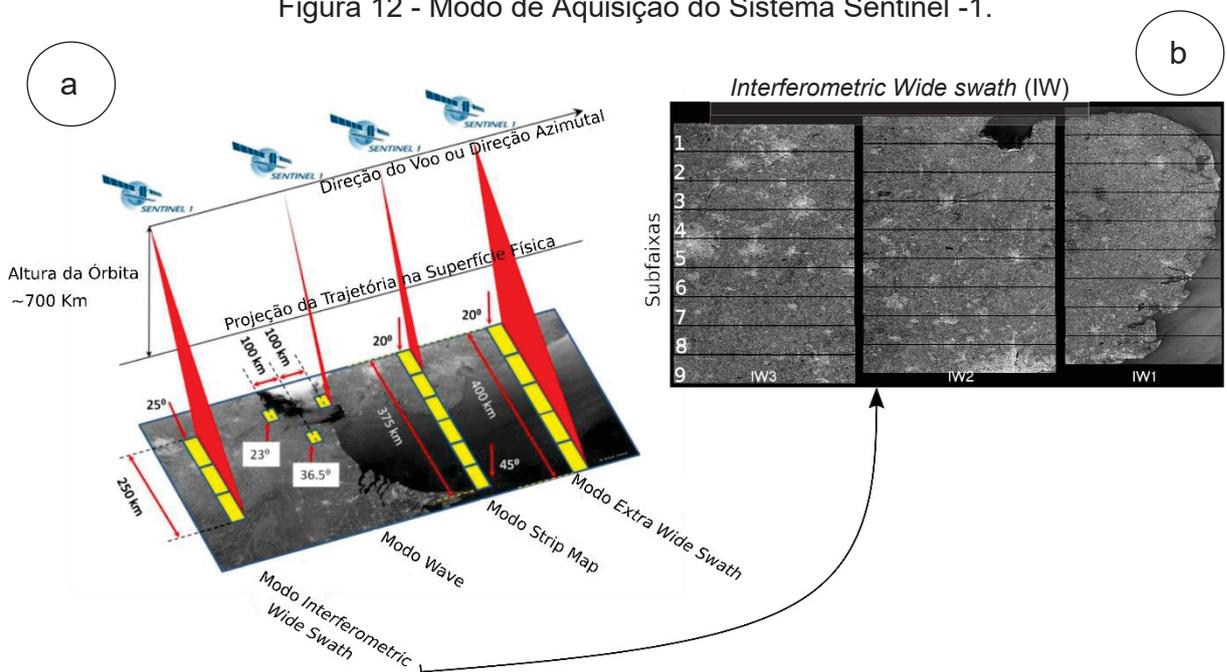


Fonte: Adaptada de Ferretti et al. (2007)

O Sentinel-1 é uma missão cujo foco é aquisição de imagens de toda a superfície terrestre utilizando instrumentos na banda-C com polarização única (HH, VV, HV ou VH) ou, dependendo do modo de aquisição, polarização dupla (HH+HV ou VV + HH). Estes instrumentos são capazes de adquirir dados em quatro modos exclusivos (Figura 12a): *Stripmap* (SM); *Interferometric Wide swath* (IW), *Extra Wide swath* (EW) e *Wave* (WV). No modo SM os dados são obtidos quando a superfície é iluminada com uma sequência contínua de pulsos de onda eletromagnética e a antena, nesse instante, fica apontada para uma única direção. Já no modo IW (Figura 12b), os dados são obtidos em três faixas usando a técnica de observação do terreno com o escaneamento progressivo (do inglês *Terrain Observation with Progressive*

*Scanning SAR* – TOPSAR [mais detalhes sobre o TOPSAR podem ser encontrados em De Zan e Guarnieri (2006)]; contudo, cada faixa forma uma imagem IW e cada imagem é formada por nove subfaixas compostas por uma série de eclosões (do inglês *burst*); no final, tem-se um produto que cobre uma faixa de 250 km a uma resolução espacial de  $5 \times 20$  m (*single look*). O EW também emprega o TOPSAR para adquirir os dados, no entanto, fornece uma cobertura bem maior se comparado com o IW. E finalmente, no modo WV os dados são observados em pequenas vinhetas separadas em intervalos regulares de 100 km ao longo da sua trajetória sobre os oceanos.

Figura 12 - Modo de Aquisição do Sistema Sentinel-1.



Fonte: Adaptada de ESA (2021b).

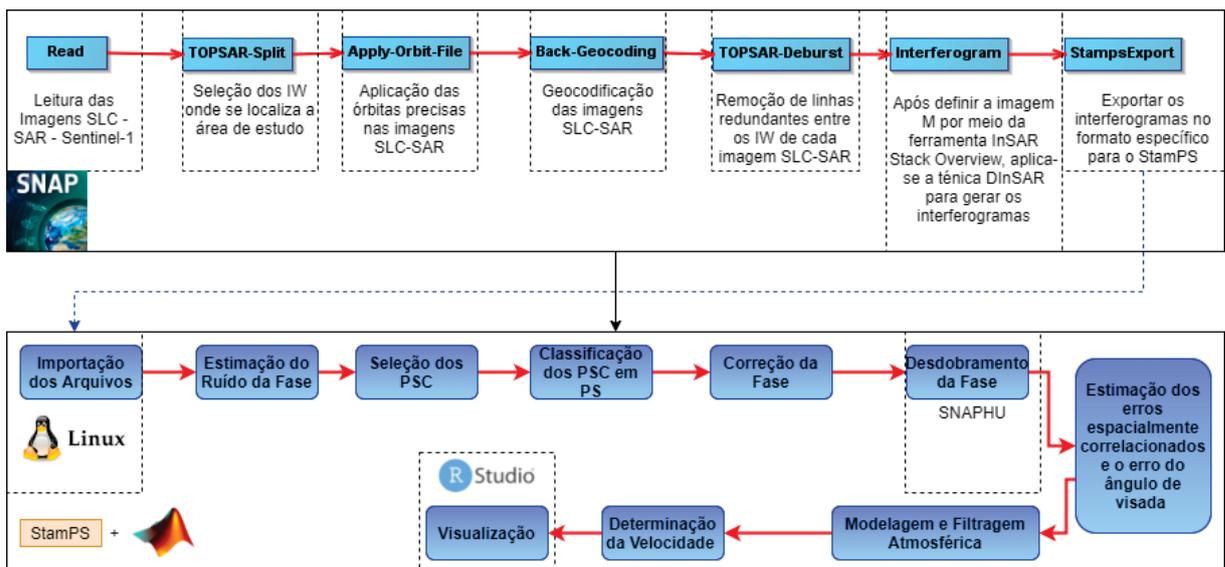
Os dados do Sentinel-1 são distribuídos pela ESA em três níveis de processamento: Nível-0, Nível-1 e Nível-2. Dados no Nível-0 são disponibilizados no formato bruto para uso específico. Os produtos do Nível-1 são processados e disponibilizados como SLC ou como *Ground Range Detected* (GRD): os dados no formato SLC já se encontram georreferenciados e focalizados, ou seja, os produtos apresentam uma visada única em cada dimensão (alcance e azimute) o que corrobora na preservação da informação da fase do sinal ecoado; por outro lado, em GRD os dados SAR são focalizados, analisados e projetados no terreno usando um modelo elipsoidal da Terra, porém, as informações de fase são perdidas. Os produtos do

Nível-2 oferecem informações geofísicas dos oceanos e são distribuídos sistematicamente.

#### 4.2 PROCESSAMENTO PSINSAR™ USANDO A INTEGRAÇÃO SNAP-STAMPS

O processamento interferométrico empregando a técnica PSInSAR™ pode ser realizado utilizando a integração dos pacotes de processamento SNAP-StaMPS. Logo, o diagrama da Figura 13 apresenta os passos necessários para realizar esse processamento dentro desse ambiente. No SNAP tem-se a etapa do pré-processamento das imagens SLC-SAR, onde realiza-se a importação destas e, posteriormente, a aplicação das órbitas precisas (processo automático de procura e *download*). Tão logo, realiza-se a seleção IW (veja a Figura 12b) – se atentando que se tenha no mínimo duas subfaixas –, as quais são formadas por eclosões (do inglês *burst*); em seguida, realiza-se o procedimento de correção de registro (vide item 2.3.1) e o processo de remoção das linhas entre as eclosões por meio do *deburst* – esse processo leva em consideração as eclosões entre as imagens *M* e *S*. Após a execução desses passos, inicia-se a etapa para a formação dos interferogramas diferenciais e, em seguida, a exportação destes no formato específico do StaMPS.

Figura 13 - Diagrama esquemático da integração SNAP-StaMPS para o processamento PSInSAR.



Fonte: O autor (2023).

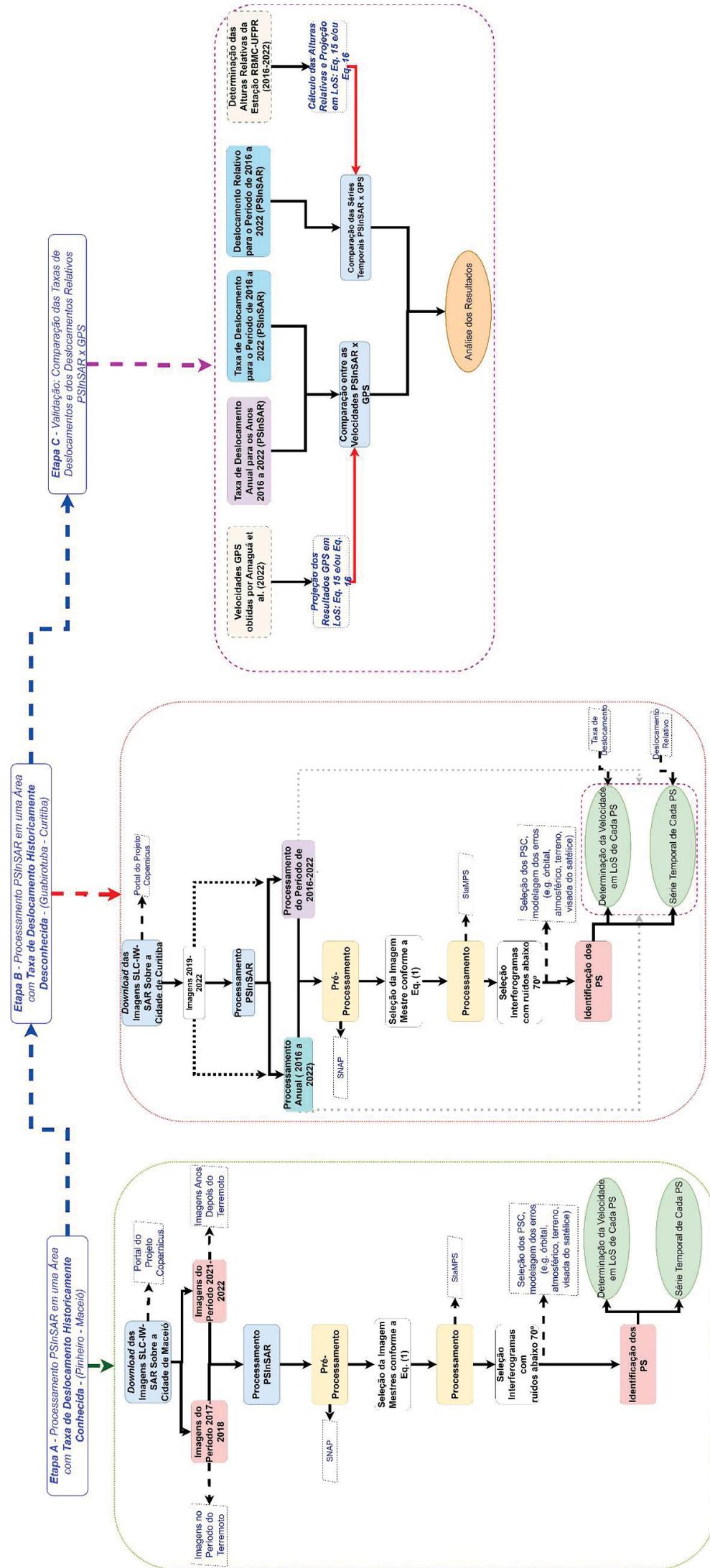
Na segunda etapa realiza-se o processamento PSInSAR™ utilizando os interferogramas diferenciais obtidos no pré-processamento. Sendo assim, os arquivos

no formato do StaMPS são colocados dentro de pastas específicas e, posteriormente, dentro do ambiente *Linux*, onde realiza-se a preparação (verificação dos *pixels* que apresentam um índice de dispersão da amplitude dentro do limiar definido) destes por meio do *script mt\_prep\_snap* – nessa etapa já se indica o limiar (Eq. 13) para seleção dos PSC, que normalmente é um valor equivalente a 0,4. Em seguida, no ambiente do Matlab®, estima-se o ruído de fase de cada *pixel*; a seleção e a classificação dos PSC's; estabelece-se a correção da fase e o desdobramento desta por meio do SNAPHU – o qual deve ser instalado de forma independente sendo necessário configurar o StaMPS (*StAMPS\_CONFIG.bash*) para chamá-lo durante o processamento; realiza-se, também, a correção e filtragem dos erros espacialmente correlacionados/erro do ângulo de visada e modelagem/filtragem dos erros causados pela atmosfera e; finalmente, determina-se a taxa de deslocamento dos PS. Maiores detalhes de cada etapa no StaMPS podem ser vistos em Hooper et al. (2018).

### 4.3 METODOLOGIA EMPREGADA PARA ANÁLISE DE SUBSIDÊNCIAS

A proposta metodológica baseia-se na integração das técnicas geoespaciais com os resultados advindos do processamento interferométrico. A Figura 14 ilustra, de uma forma resumida, a sequência a ser adotada para a execução das atividades. Como pode ser observado a metodologia está sendo dividida em três etapas principais: Etapa A, Etapa B e Etapa C. Os itens apresentados na sequência, nesta seção, descreverão como cada etapa será desenvolvida.

Figura 14 - Fluxograma da Metodologia Empregada

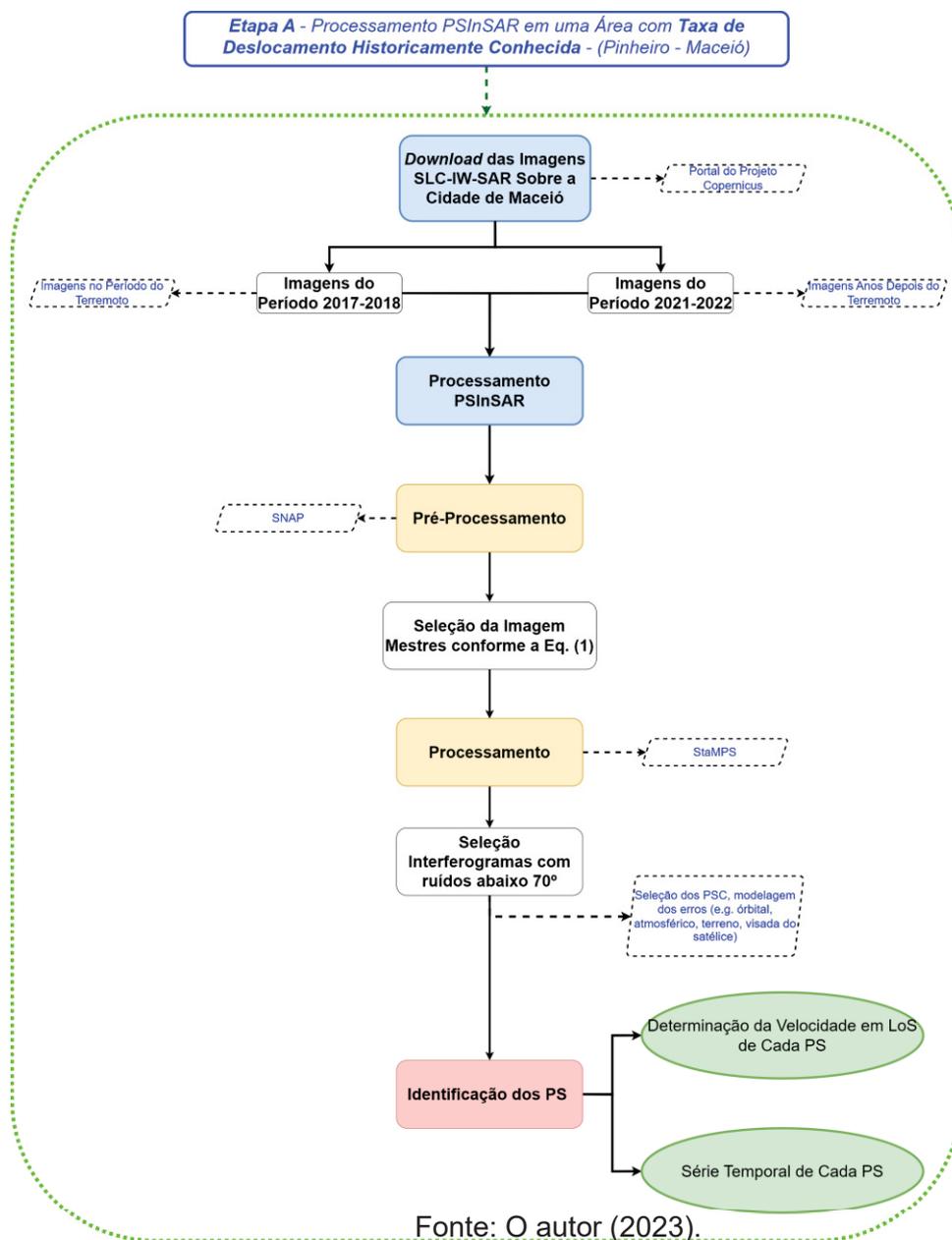


Fonte: O autor (2023).

#### 4.3.1 Etapa A – Processamento PSInSAR™ em uma Área com Histórico de Subsidiência

Nesta etapa, conforme destacado no fluxograma apresentado na Figura 15, realizou-se o processamento interferométrico empregando-se a técnica PSInSAR™ (vide as etapas desse processamento no item 4.2) em uma área com histórico de subsidência, localizada no bairro Pinheiro da cidade de Maceió. Essa área foi apresentada no item 3.1.

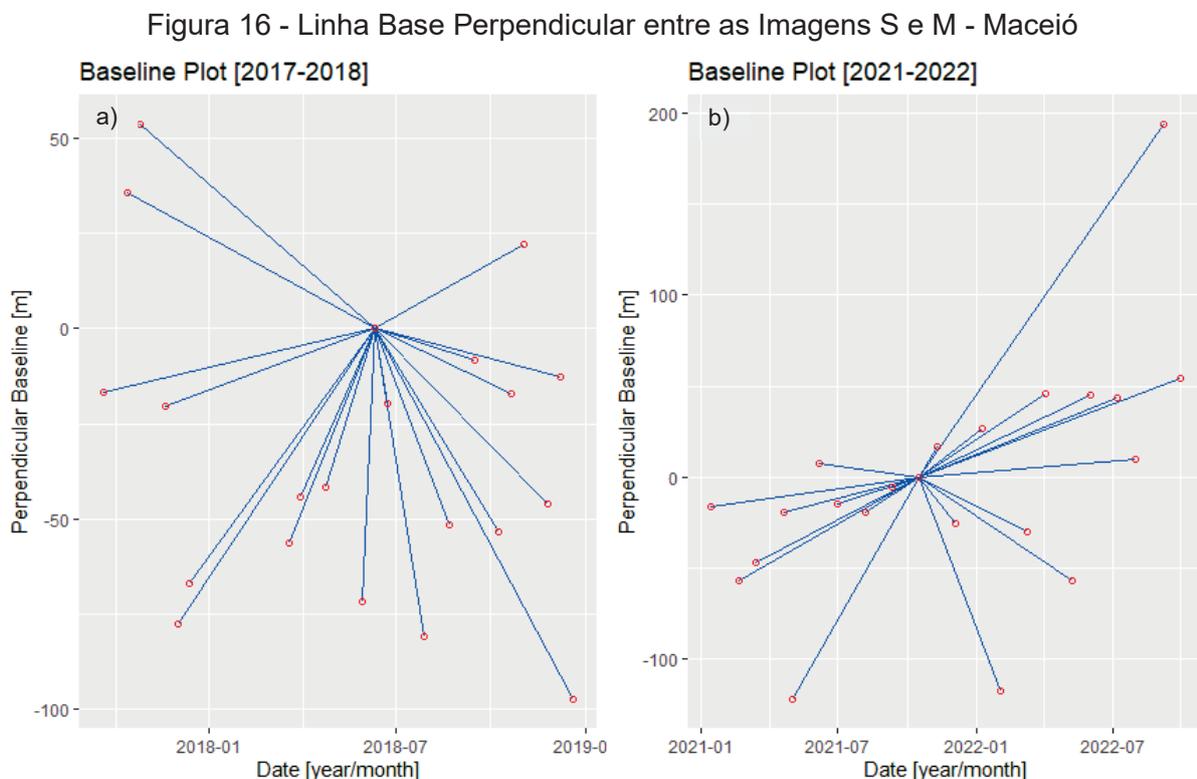
Figura 15 - Fluxograma da Etapa A: Processamento sobre o bairro Pinheiro - Maceió



Nessa etapa, além de detectar eventos previamente identificados, o objetivo foi analisar a presença de regiões instáveis na área em estudo. Para isso, o processamento foi realizado em duas fases distintas: a primeira no período em que ocorreu o evento sísmico (2017-2018) e a segunda utilizando imagens mais recentes (2021-2022).

Nesse sentido, foram executados dois processamentos interferométricos: um com imagens SLC-SAR obtidas no período em que ocorreu o terremoto e o outro processamento com imagens adquiridas em período mais recente. No primeiro processamento, considerou-se um conjunto de 21 imagens SLC-SAR do Sentinel-1A imageadas no modo descendente, de setembro de 2017 a dezembro de 2018. A imagem de 11 de junho de 2018 foi usada como mestre. Nesse processamento procurou-se verificar a capacidade do processamento interferométrico em detectar o processo de subsidência e, além disso, verificar a sua taxa de deslocamento. Já no segundo processamento, foi usado um conjunto de 22 imagens SLC-SAR coletadas em modo descendente entre janeiro de 2021 e setembro de 2022, sendo a imagem capturada em 17 de outubro de 2021 considerada mestre. Aqui procurou investigar se a área ainda vem sofrendo o processo de subsidência e quantificar a taxa de deslocamento.

A Figura 16 apresenta as distâncias das linhas bases perpendiculares das imagens S em relação à mestre. No eixo das abscissas encontra-se as informações sobre a data de aquisição das imagens SLC-SAR. No eixo das ordenadas, contém a distância da linha base perpendicular das imagens S em relação à imagem mestre.



Fonte: O autor (2023).

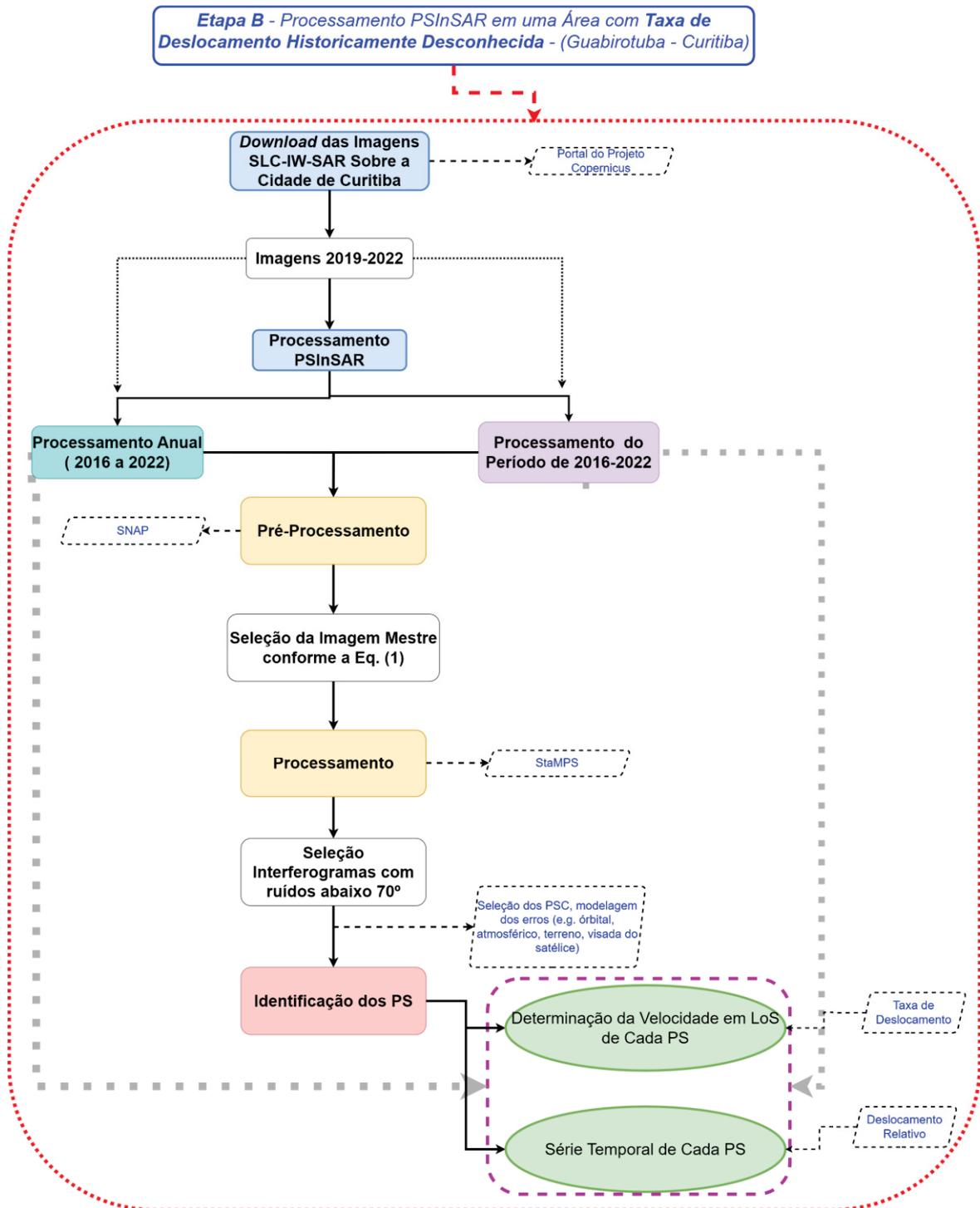
Sendo a) apresenta a linha base perpendicular das imagens obtidas no período de 2017 a 2018 e b) no período de 2021-2022.

A seleção da imagem mestre foi realizada com base no critério de maximização da coerência entre a linha de base temporal, a linha de base perpendicular e a frequência do Doppler em todas as imagens SLC-SAR, conforme destacado pelas Eq. 1 e 2. Após a geração dos interferogramas, estes foram selecionados levando em consideração as informações de ruído presentes. Como resultado, interferogramas com ruído superior a 70 graus foram excluídos. Em seguida, iniciou-se a etapa de processamento empregando a técnica PSInSAR™. Tanto a seleção das imagens mestres quanto a filtragem dos interferogramas ruidosos foram realizadas em todas as etapas em que ocorreu um processamento interferométrico.

#### *4.3.2 Etapa B – Processamento interferométrico sobre o bairro do Guabirotuba*

Na etapa B, o processamento interferométrico empregando a técnica PSInSAR™ foi dividido em duas fases, conforme indicado pelo fluxograma da Figura 17. Na primeira fase, utilizou-se um conjunto de imagens SLC-SAR obtidas no período de 2016 a 2022. O objetivo dessa fase foi computar a taxa de deslocamento ao longo desse intervalo de tempo, fornecendo uma visão geral das mudanças ocorridas na área em estudo durante esses anos. Já na segunda fase, utilizou-se imagens SLC-SAR adquiridas mensalmente de cada ano, ou seja, uma imagem SLC-SAR obtida em cada mês do ano em questão. Isso resultou em um processamento com um conjunto de imagens para cada ano, ou seja, um conjunto para 2016, outro para 2017, e assim por diante, até 2022. O objetivo desse segundo processamento foi verificar as taxas de deslocamento durante um período de um ano específico. Além disso, essa abordagem permitiu detectar PS que provavelmente não foram identificados no período de 2016-2022, devido à perda de correlação temporal e espacial.

Figura 17 - Fluxograma da Etapa B: Processamento sobre o bairro do Guabirota - Curitiba



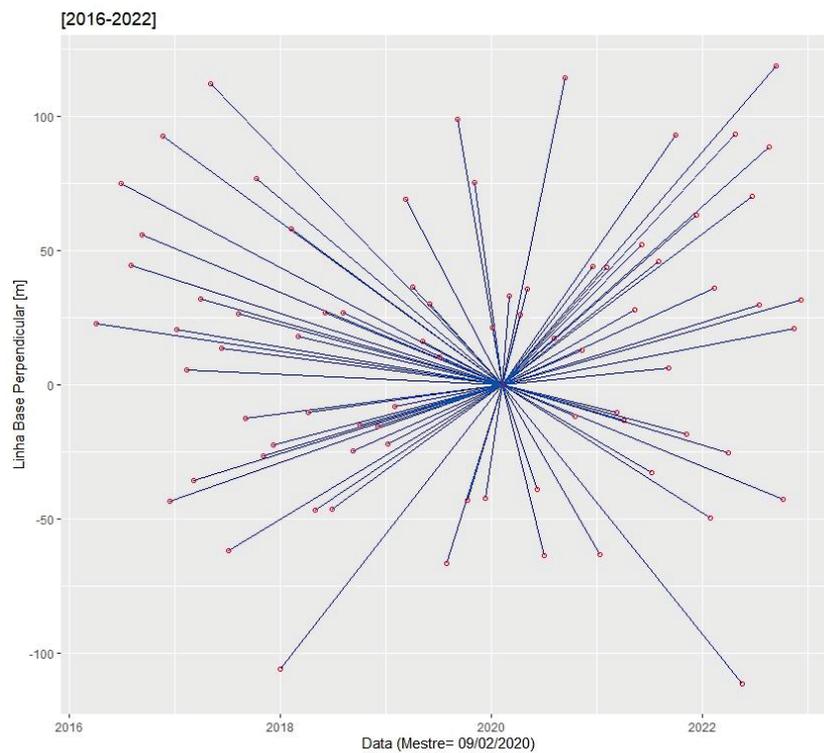
Fonte: O autor (2023).

Nesta etapa, um total de 77 imagens SLC-SAR da missão Sentinel-1A foram empregadas. Todas essas imagens foram processadas em conjunto utilizando a técnica PSInSAR™. O segundo processamento foi realizado utilizando uma pilha de imagens adquiridas no mesmo ano. As velocidades dos deslocamentos do terreno (PS) resultantes desses processamentos foram então comparadas com as velocidades obtidas a partir de observações GPS, projetadas na direção da linha de visada (LoS) da plataforma SAR.

#### 4.3.2.1 Processamento PSInSAR™ do Período de 2016-2022

O processamento interferométrico foi realizado utilizando a técnica PSInSAR™, empregando a integração dos pacotes de processamento SNAP-StaMPS. Para o processamento foram utilizadas 77 imagens SAR da missão Sentinel-1A, capturadas no modo descendente, durante o período de 2016 a 2022. As imagens dos anos de 2020, 2021 e 2022 foram usadas para verificar o comportamento da área após o período investigado por Werlich (2017) e Amagua et al. (2022), que foi de 2014 a 2019. As imagens dos anos de 2014 e 2015 não foram consideradas, pois não havia imagens SAR do Sentinel-1 disponíveis nesse período. Nesse processamento a imagem obtida na data do dia 08 de fevereiro de 2020 foi considerada como mestre. A Figura 18 apresenta a distribuição das imagens utilizadas nesse processamento.

Figura 18 - Processamento PSInSAR utilizando 77 imagens SLC-SAR - Curitiba



Fonte: O autor (2023).

Nesse processamento foram utilizadas 77 imagens SLC-SAR do Sentinel-1A.

A Tabela 10 contém uma síntese das informações essenciais sobre as imagens utilizadas nesta etapa de processamento. Além disso, ela inclui o ângulo de incidência do radar no ponto de espalhamento ( $\theta$ ) e a direção azimutal do satélite ( $\alpha_n$ ) da imagem M capturada em 9 de fevereiro de 2020. Esses dados foram utilizados nas análises detalhadas na seção 4.3.3.

Tabela 10 - Informações dos Ângulos Azimutais e de Incidência da Imagem M capturada no dia 9/02/2020.

<b>Atributos</b>	<b>Valores</b>
Ângulo Direção Azimutal do Satélite (graus decimais)	-167,4701
Data de Aquisição	09/02/2020
Missão	Sentinel 1-A
Produto	SLC
Polarização	VV
Banda	C
Modo de Aquisição das Imagens	IW
Faixa Utilizada no Processamento	IW3
Órbita	31173
Ângulo de Incidência Médio (graus decimais)	42,28433

Fonte: O autor (2023).

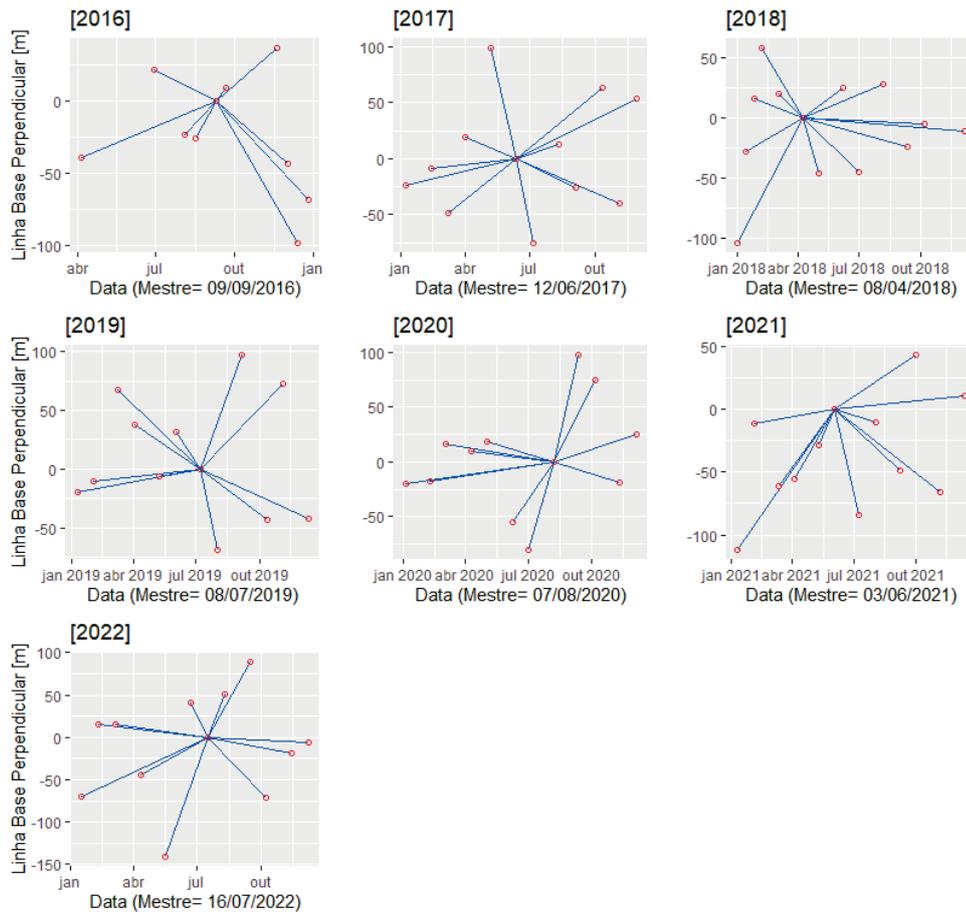
Nesse teste, foram analisadas as taxas de deslocamento dos PS obtidos no processamento PSInSAR<sup>TM</sup> supracitado. Em seguida, essas taxas foram comparadas com os deslocamentos obtidos pelo GPS, conforme registrado por Amagua et al. (2022). Além disso, foram avaliadas as séries temporais derivadas das observações GPS da estação RBMC-UFPR em comparação com as séries temporais resultantes do processamento PSInSAR<sup>TM</sup>. Durante o processo de análise, dois PS próximos à estação RBMC-UFPR foram selecionados, conforme ilustrado na Figura 9a. Ressalta-se que a estação UFPR é uma estação pertencente à RBMC.

Para mais detalhes sobre esse processo de análise, consulte a Etapa C, descrita na seção 4.3.3.

#### 4.3.2.2 Processamento PSInSAR<sup>TM</sup> para os anos de 2016 a 2022

Nessa fase, foram empregadas imagens SLC-SAR adquiridas nos anos de 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022. Com isso, o processamento seguiu as mesmas etapas detalhadas na seção 4.2. A distribuição das imagens S em relação à imagem M para cada conjunto processado pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Linha Base Perpendicular entre as Imagens S e M (Anual de 2016 a 2022) - Curitiba



Fonte: O autor (2023).

As imagens foram organizadas por ano, resultando na criação de pilhas anuais de imagens SLC-SAR. Cada uma dessas pilhas de imagens foi processada de forma individual.

As informações referentes ao ângulo de incidência médio sobre a região do Guabirota e o ângulo azimutal na época em que a imagem M foi adquirida estão apresentadas na Tabela 11. Conforme observado nessa mesma tabela, é possível notar que, no ano de 2016, apenas 10 imagens SLC-SAR foram utilizadas no processamento. No entanto, para esse processamento em particular, todas as imagens disponíveis foram utilizadas, diferentemente dos demais anos em que foi possível obter uma imagem por mês.

Tabela 11 - Número de Imagens SLC-SAR utilizadas no Processamento PSInSAR - Curitiba

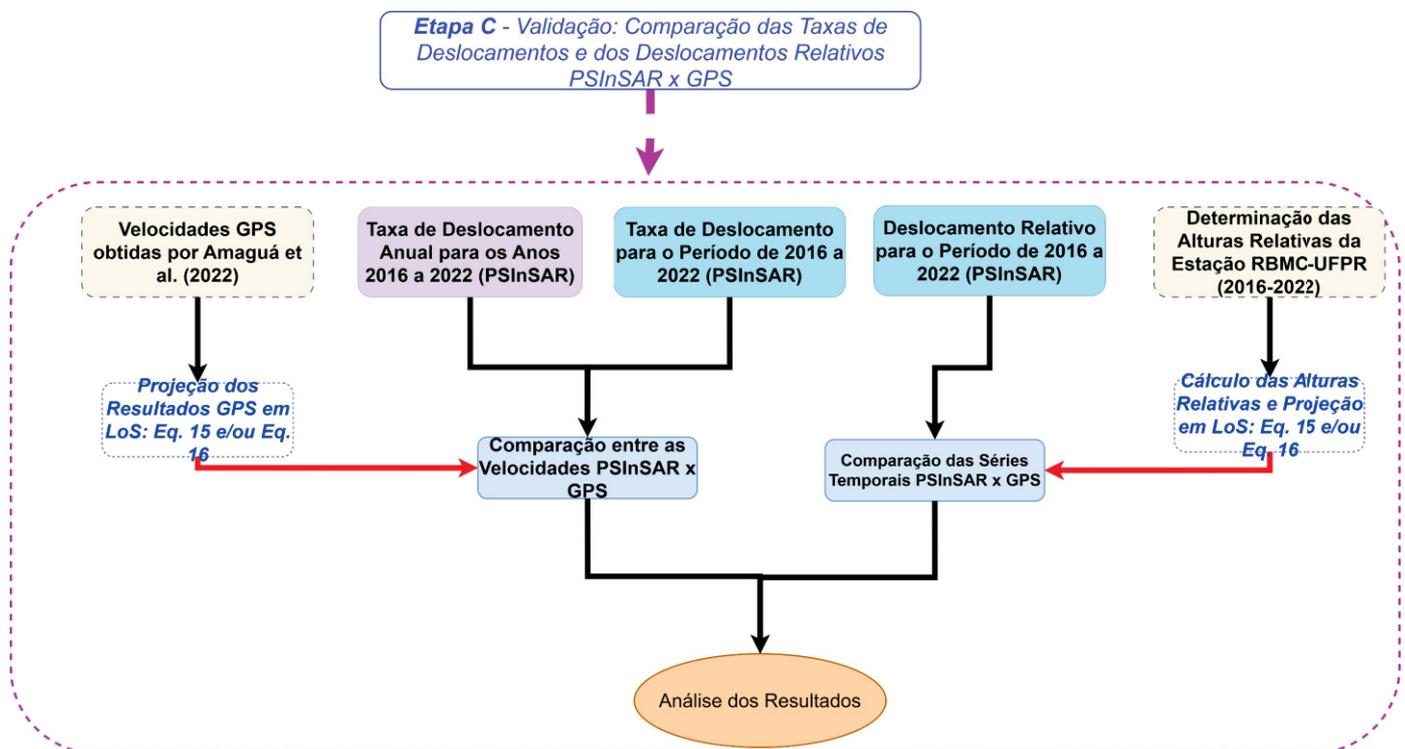
Ano	Número de Imagens	Ângulo da Direção Azimutal [graus]	Ângulo de Incidência Médio [graus]	Data Aquisição da Imagem M
2016	10	-167,4469	42,22152	09/09/2016
2017	12	-167,7469	42,21896	12/06/2017
2018	13	-167,6684	42,21534	08/04/2018
2019	12	-167,4685	42,31521	08/07/2019
2020	12	-167,5691	42,11862	07/08/2020
2021	12	-167,4681	42,59889	03/06/2021
2022	12	-167,5692	42,37106	16/07/2022

Fonte: O autor (2023).

No contexto desse processamento, foram comparadas apenas as velocidades obtidas pela técnica PSInSAR™ com as velocidades obtidas por Amagua et al. (2022). É relevante mencionar que Werlich (2017) realizou levantamentos semestrais ao longo do ano, com alguns anos tendo apenas dois levantamentos. Portanto, não houve uma comparação direta das séries temporais entre o estudo de Werlich (2017) e o presente processo de análise.

#### 4.3.3 Etapa C – Comparação das velocidades e dos deslocamentos relativos dos PS do processamento PSInSAR™ e do estudo realizado com o GPS.

Figura 20 - Comparação das Taxas de deslocamento e Deslocamentos Relativos (GPS x PSInSAR™)



Fonte: O autor (2023).

Nesta fase, o objetivo foi compreender os resultados do processamento interferométrico por meio da comparação com os resultados provenientes de uma técnica distinta, neste caso, utilizando observações GNSS. Essa comparação só foi viável após todos os resultados serem transformados para um sistema de referência comum. Para isso, utilizou-se a direção da LoS do satélite como base de referência.

Esta etapa seguiu as etapas definidas no fluxograma da Figura 20. Contudo, é sabido que o processamento de observações GNSS fornece resultados com velocidades e coordenadas em um espaço tridimensional (3D) e o PSInSAR™, no entanto, apenas no espaço unidimensional (1D) - na direção de LoS. Nesse caso, o deslocamento e a velocidade tridimensional de um objeto descritos nas direções norte

(*north*), leste (*east*) e vertical (*up*), por exemplo, podem ser projetados em LoS empregando-se as Eq. (15) e (16) (ARIKAN et al., 2009; HASTAOGLU, 2016):

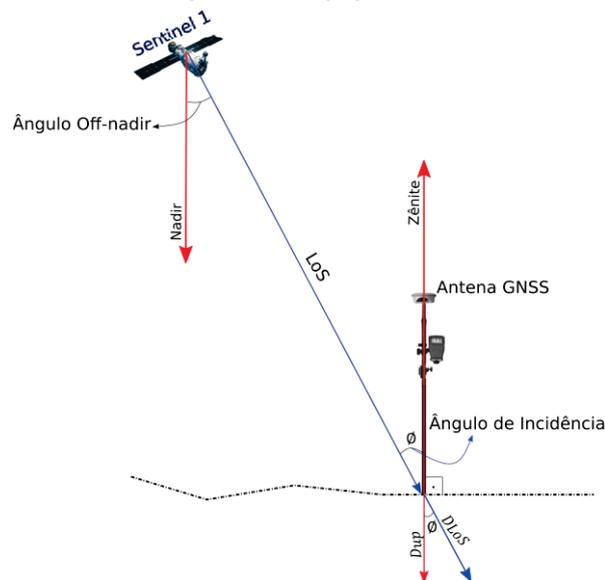
$$D_{LoS} = -\cos\alpha_h \sin\phi d_e + \sin\alpha_h \sin\phi d_n + \cos\phi d_{up} \quad (15)$$

com  $\phi$  o ângulo de incidência do radar no ponto de espalhamento em relação ao Datum WGS84,  $\alpha_h$  a direção azimutal do satélite e  $d$  o deslocamento superficial.

Outra maneira de compatibilizar as velocidades obtidas pelas técnicas PSInSAR™ e GNSS, é utilizar apenas as velocidades e/ou deslocamento vertical (*up*) (Figura 21). Nesse caso, os deslocamentos horizontais são desconsiderados e a Eq. (15) fica reduzida conforme apresentado na Eq. (16).

$$D_{LoS} = \cos\phi d_{up} \quad (16)$$

Figura 21 - Representação da Projeção da Velocidade em LoS



Fonte: O autor (2023).

Desse modo, foram realizadas duas análises comparativas:

### I. Comparação entre as velocidades GPS e dos PS da PSInSAR™

Na primeira análise, as velocidades GPS obtidas por Amagua et al. (2022) foram projetadas em LoS e comparadas com as velocidades calculadas pela técnica PSInSAR™. Aqui foram consideradas as velocidades obtidas pelo processamento interferométrico do período 2016-2022 e nos anos de 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022;

## II. Comparação entre as séries temporais obtidas pelo GPS e dos PS da PSInSAR™

Na segunda análise, as séries temporais obtidas com a PSInSAR™ foram comparadas com a série gerada pelas observações GNSS da estação de referência utilizada no processamento de Amagua et al. (2022) – a estação UFPR da RBMC (RBMC - UFPR). Para esse fim, foram selecionados os PS mais próximos dessa estação RBMC-UFPR e, no entanto, a série temporal desta estação foi gerada utilizando os dados GNSS, que são disponibilizados gratuitamente pelo *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL) (BLEWITT et al., 2018). As coordenadas da estação RBMC-UFPR, no sistema local (*north, east, up*), foram utilizadas para esse processo comparativo. Nessa análise foram utilizadas as séries temporais do processamento interferométrico do período 2016-2022 apenas.

## III. Obtenção das alturas relativas das observações GPS

Ressalta-se ainda que a técnica PSInSAR™ fornece como resultado as alturas relativas entre as imagens S e a imagem M. Para calcular essa variação das altitudes da estação RBMC-UFPR, utilizou-se a coordenadas *north, east* e *up* e aplicou-se os seguintes procedimentos:

- i. Selecionou-se as coordenadas locais na mesma data de aquisição das imagens S;
- ii. Projetou-se estas coordenadas em LoS (Eq. (15) Eq. (16)), usando o ângulo de incidência médio dentro da rede GPS do Guabirota e o ângulo zenital da imagem M (Tabela 10);
- iii. Determinou-se as alturas relativas das coordenadas do GPS em LoS, que foram obtidas por meio da diferença entre as coordenadas projetadas e a coordenada da estação do mesmo dia da aquisição da imagem M;
- iv. Retirou-se a tendência das séries e, por fim;
- v. Plotou-se as séries temporais e calculou-se o coeficiente de correlação entre elas.

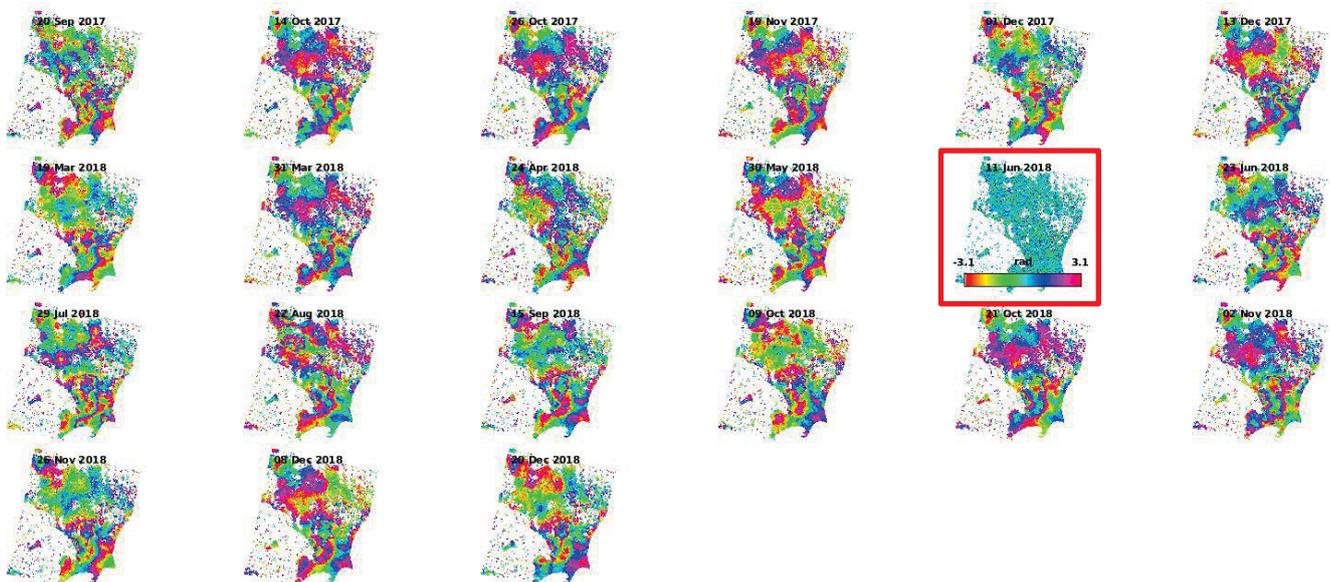
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos processamentos citados nas etapas A, B e C.

### 5.1 RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA-A (MACEIÓ)

Com base no que foi descrito na seção 4.3.1, foram utilizadas 21 imagens durante o período de 2017-2018, gerando 20 interferogramas diferenciais. A Figura 22 exhibe 21 interferogramas, nos quais as fases não foram desdobradas (mais informações nas seções 2.3.1 e 2.3.1.1). No entanto, é importante notar que o interferograma destacado pelo retângulo vermelho não foi considerado, pois foi computado por meio da multiplicação cruzada entre a própria imagem mestre (imageada no dia 11/06/2018).

Figura 22 - Interferogramas diferenciais das Imagens SLC-SAR do período de 2017-2018 (sem desdobramento da fase).

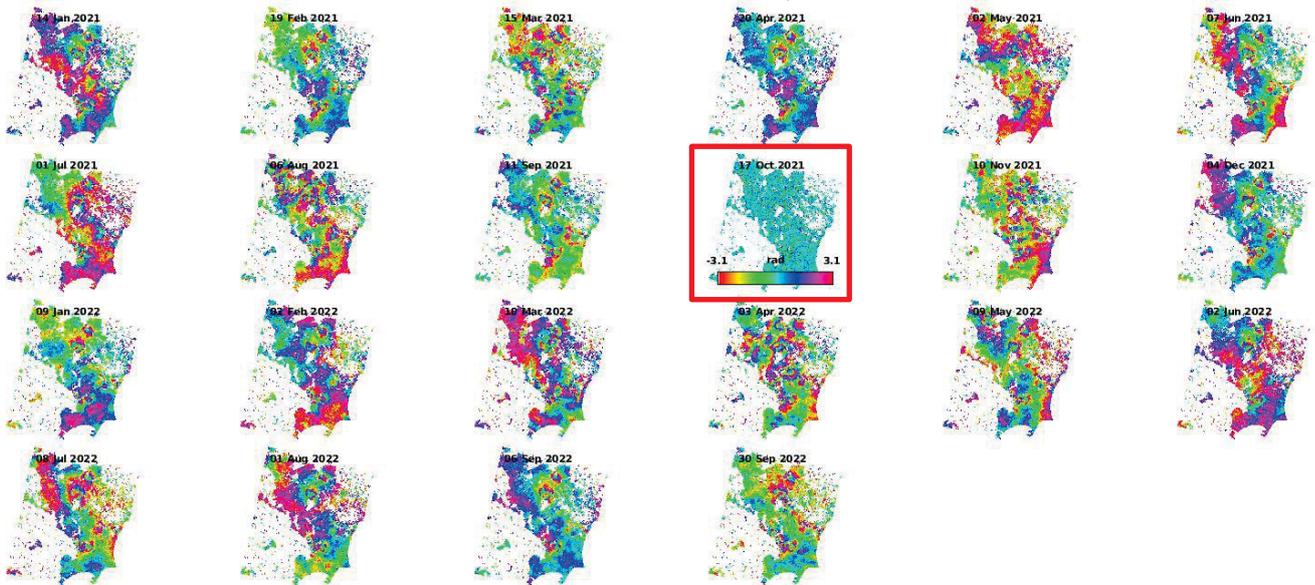


Fonte: O autor (2023).

O interferograma realçado pelo retângulo vermelho ilustra o resultado da técnica de multiplicação cruzada entre a imagem mestre e sua própria versão. As cores, conforme representadas na barra de referência no interior do interferograma destacado pelo retângulo vermelho, correspondem aos ciclos completos presentes no espectro.

A Figura 23 apresenta os 22 interferogramas diferenciais obtidos no processamento do período de 2021-2022. O interferograma destacado em vermelho, conforme mencionado anteriormente, foi gerado por meio da multiplicação complexa entre a imagem Mestre (data 17/10/2021).

Figura 23 - Interferogramas diferenciais das Imagens SLC-SAR do período de 2021-2022 (sem desdobramento da fase).



Fonte: O autor (2023).

Após a geração dos interferogramas diferenciais, é fundamental que sejam eliminados aqueles que apresentam alto ruído. Isso ocorre porque interferogramas ruidosos dificultam o processo de desdobramento da fase, o que acaba prejudicando a seleção dos PS durante o processamento PSInSAR™. Entretanto, determinar quais interferogramas devem ser descartados pode ser uma tarefa complexa ao se analisar apenas as Figura 22 e Figura 23. Nesse sentido, uma alternativa é avaliar os ruídos dos interferogramas, de forma a indicar quais interferogramas são mais suscetíveis a prejudicar o processamento. Em alguns testes realizados, constatou-se que interferogramas com ruídos acima de 70 graus são altamente prejudiciais e devem ser descartados.

As Tabela 12 e Tabela 13 apresentam os valores de ruídos dos interferogramas gerados nas Figura 22 e Figura 23, respectivamente. Nota-se que não foi necessário retirar nenhum interferograma e assim, pôde-se continuar o processamento.

Tabela 12 - Informação de Ruído dos Interferogramas 2017-2018.

Data Aquisição da Imagem SLC-SAR	Linha Base Perpendicular [m]	Ruído [graus]
20/set/17	-14	48,384
14/out/17	39	33,213
26/out/17	64	32,531
19/nov/17	2	36,268
01/dez/17	-52	35,143
13/dez/17	-42	34,846
19/mar/18	-20	33,005
31/mar/18	-13	39,326
24/abr/18	-41	48,718
30/mai/18	-80	32,881
11/jun/18 [Mestre]	0	50,358
23/jun/18	-34	32,631
29/jul/18	-78	35,206
22/ago/18	-42	34,307
15/set/18	-12	35,791
09/out/18	-56	32,137
21/out/18	-10	30,422
02/nov/18	32	33,526
26/nov/18	-20	39,57
08/dez/18	10	33,392
20/dez/18	-74	34,156

Fonte: O autor (2023).

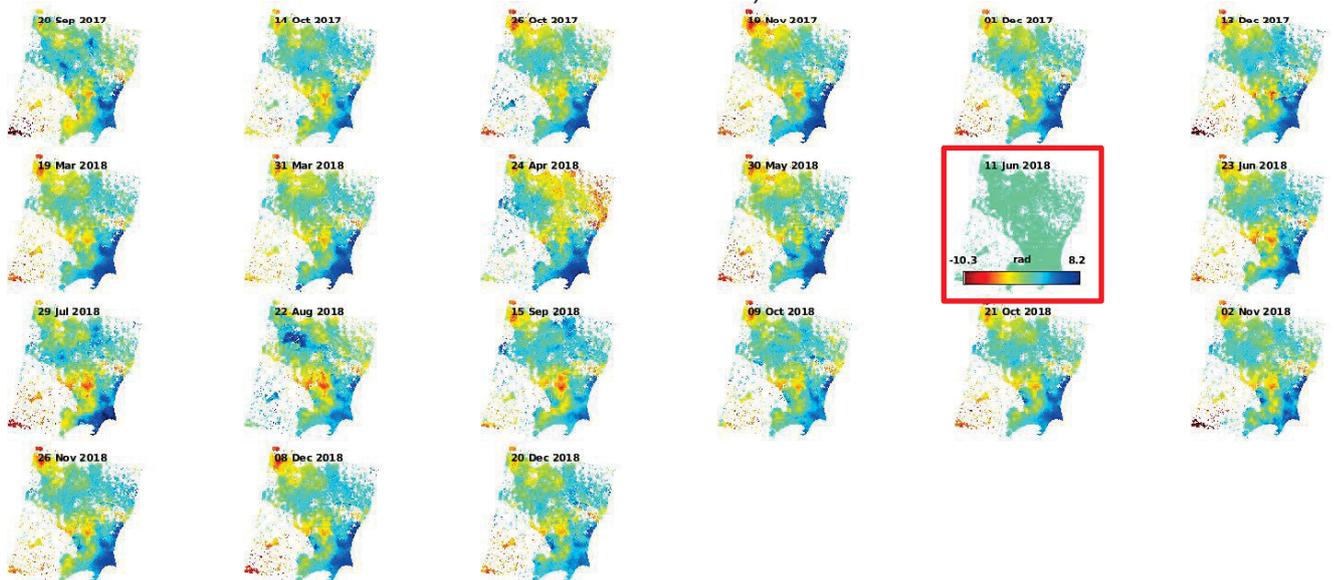
Tabela 13 - Informação de Ruído dos Interferogramas 2021-2022.

Data Aquisição da Imagem SLC-SAR	Linha Base Perpendicular [m]	Ruído [graus]
14/jan/21	1	39,464
19/fev/21	-35	35,837
15/mar/21	-14	37,146
20/abr/21	-24	34,695
02/mai/21	-127	35,129
07/jun/21	-17	34,613
01/jul/21	-29	40,015
06/ago/21	-35	40,513
11/set/21	-28	31,756
17/out/21 [Mestre]	0	39,133
10/nov/21	28	34,315
04/dez/21	-5	32,998
09/jan/22	41	30,598
02/fev/22	-97	34,085
10/mar/22	-9	34,479
03/abr/22	64	34,100
09/mai/22	-76	39,304
02/jun/22	33	40,160
08/jul/22	22	40,695
01/ago/22	-9	38,056
06/set/22	187	26,92
30/set/22	43	38,33

Fonte: O autor (2023).

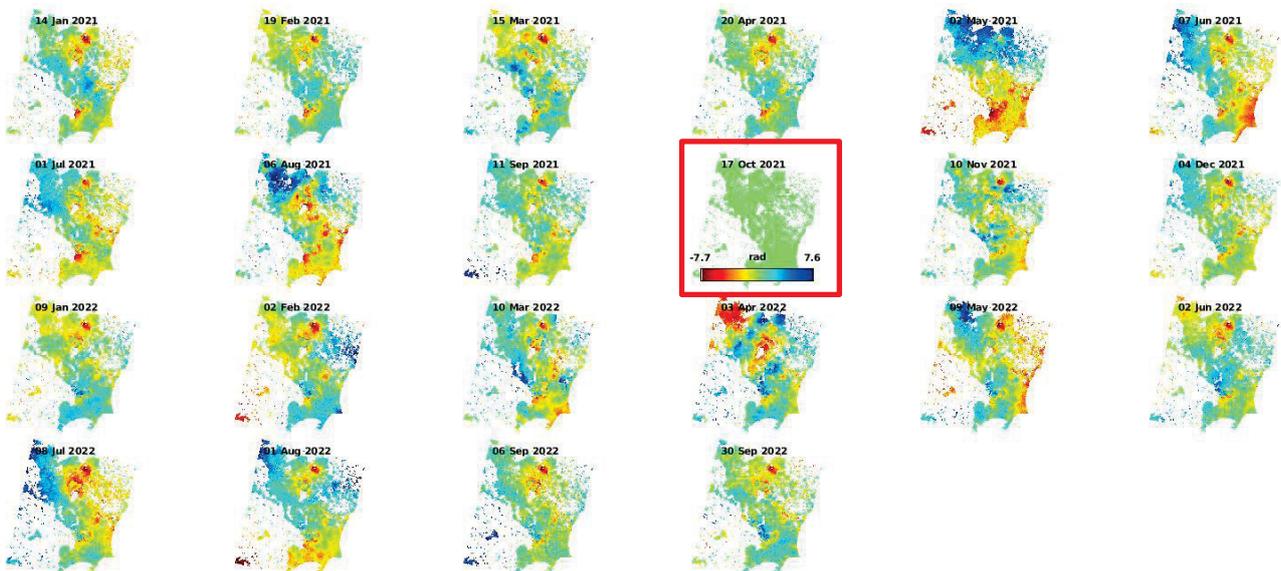
Após o desdobramento da fase, foram gerados os interferogramas apresentados nas Figura 24 e Figura 25. Vale ressaltar que o interferograma referente ao dia 11 de junho de 2019, assim como o do dia 17 de outubro de 2021 da Figura 25, exibiram valores de fase próximos a zero radianos, indicando que a multiplicação da imagem mestre pelo seu conjugado gerou resíduos quase imperceptíveis. Tal constatação é de grande importância, uma vez que interferogramas com valores residuais elevados podem comprometer a qualidade do resultado final obtido por meio do processamento PSInSAR™.

Figura 24 - Interferogramas diferenciais das Imagens SLC-SAR do período de 2017-2018 (fase desdobrada).



Fonte: O autor (2023).

Figura 25 - Interferogramas diferenciais das Imagens SLC-SAR do período de 2021-2022 (fase desdobrada).

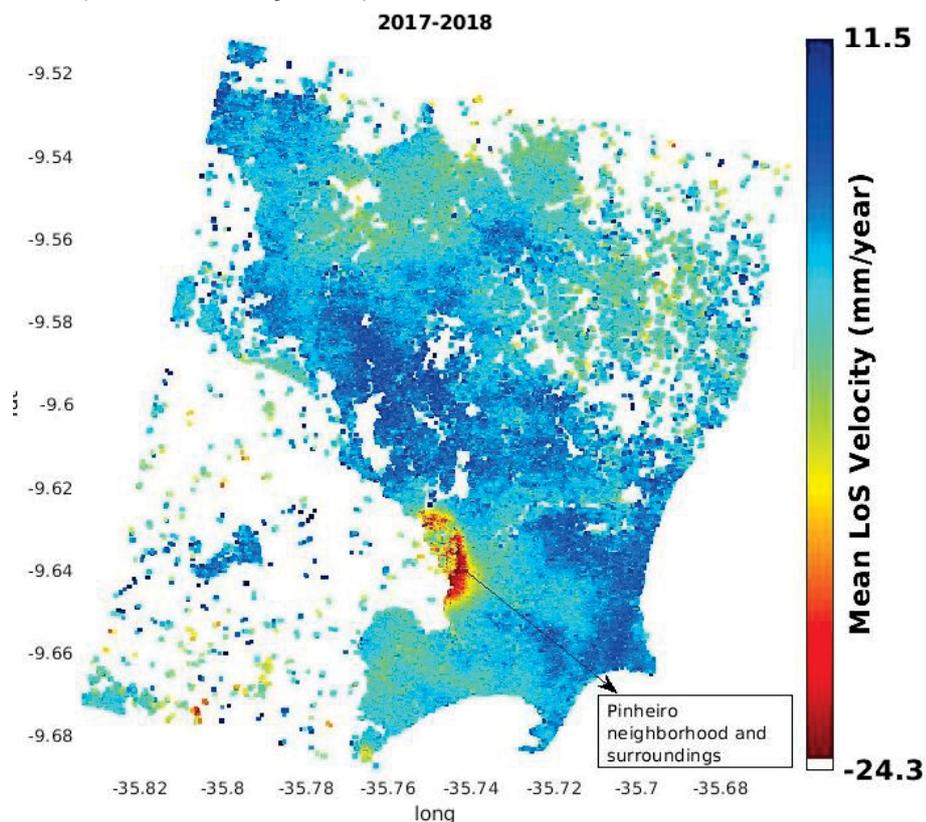


Fonte: O autor (2023).

O estágio de análise dos interferogramas é de suma importância no processo de PSInSAR™, pois interfere diretamente na seleção dos PS e torna mais complexa a separação das fases de deslocamento das fases de órbita, atmosférica e de terreno. Por isso, é necessário ter muita atenção ao analisar os interferogramas gerados, a fim de identificar possíveis distorções que possam comprometer o resultado final do processamento. A correta separação das fases é fundamental para a obtenção de informações precisas acerca do comportamento da superfície terrestre e suas deformações.

Após o processamento PSInSAR™, o resultado obtido consiste na obtenção de pixels com informações de deslocamento, o que permite a análise da movimentação da superfície terrestre ao longo do tempo. Na Figura 26 é possível observar a distribuição espacial dos PS selecionados durante o processamento, que proporcionaram a obtenção de velocidades que variaram de -24,5 a 11,5 mm/ano.

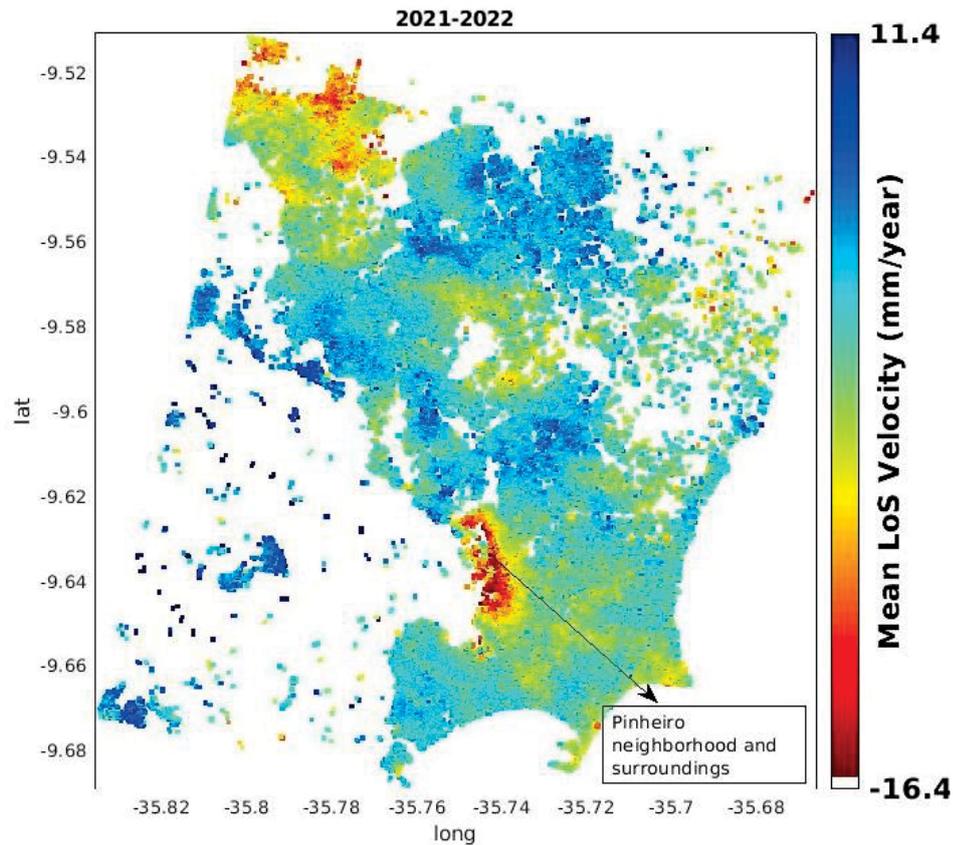
Figura 26 - Mapa da Distribuição Espacial dos PS Obtidos no Processamento 2017-2018.



Fonte: O autor (2023).

A Figura 27 ilustra os resultados do processamento realizado no período de 2021-2022, no qual foi possível observar uma variação média de velocidade em linha de visada (LoS) entre -16,4 a 11,4 mm/ano.

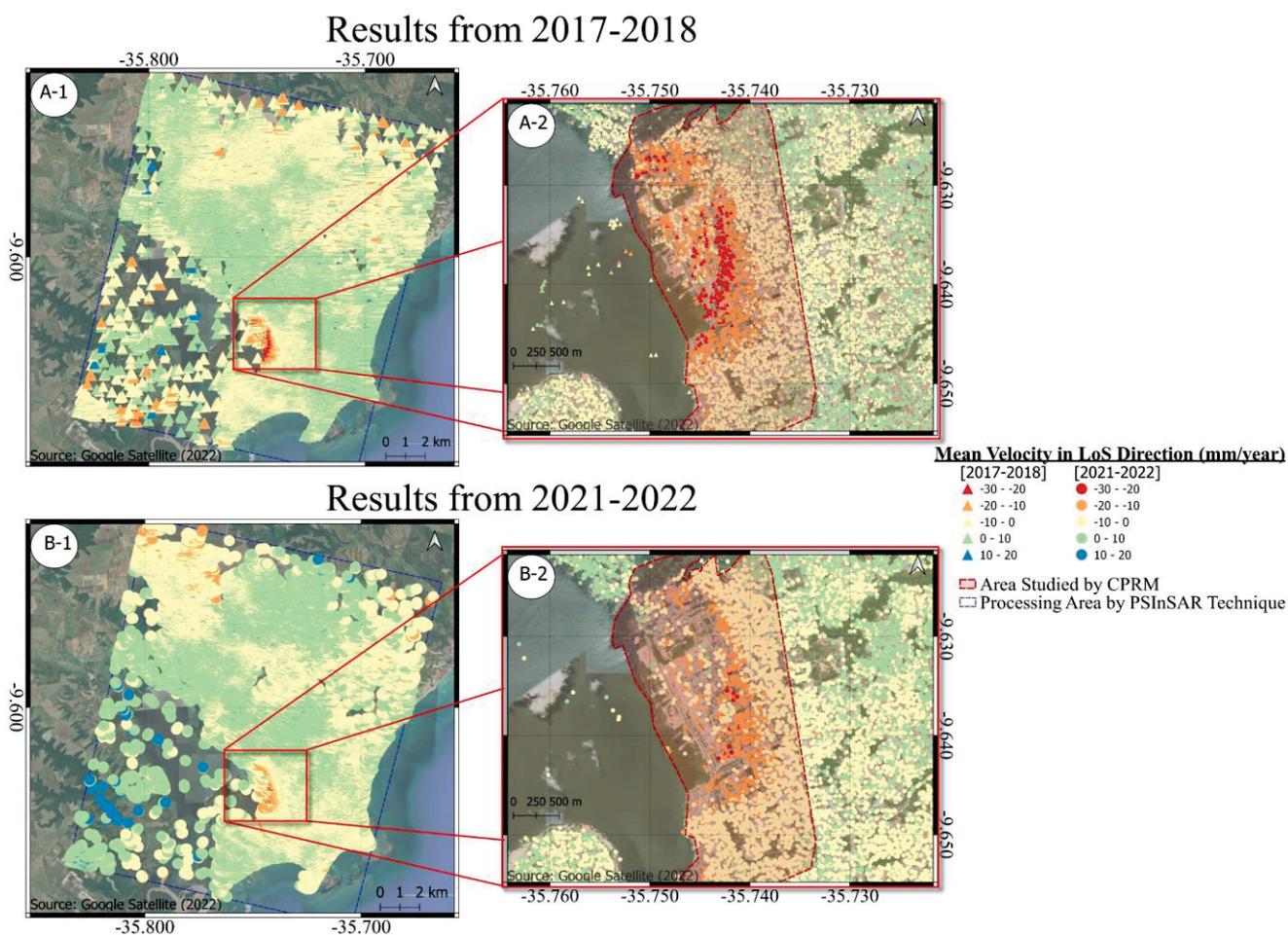
Figura 27 - Mapa da Distribuição Espacial dos PS Obtidos no Processamento 2021-2022.



Fonte: O autor (2023).

Os parágrafos a seguir pertencem ao segundo artigo que se encontra no Anexo II – Resumo Artigo 2 ([https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2023\\_46\\_56709](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_56709)).

Os PS apresentados nas Figura 26 e Figura 27 foram exportados e exibidos utilizando o software QGIS. No período de 2017-2018 e 2021-2022, foram detectados 66011 e 63672 PS com fases estáveis, respectivamente, que foram distribuídos espacialmente na área de estudo, como ilustrado na Figura 28. As Figura 28a-1 e b-1 apresentam a distribuição dos PS em um subconjunto da área, enquanto as Figura 28a-2 e b-2 destacam a região com taxas de deslocamento negativas, indicando subsidência. Verificou-se que os PS localizados próximos aos pontos com velocidades negativas apresentaram uma variação sazonal de velocidade média LoS, variando de 10 a -10 mm, o que sugere a influência de fatores sistemáticos na movimentação da superfície terrestre na região.

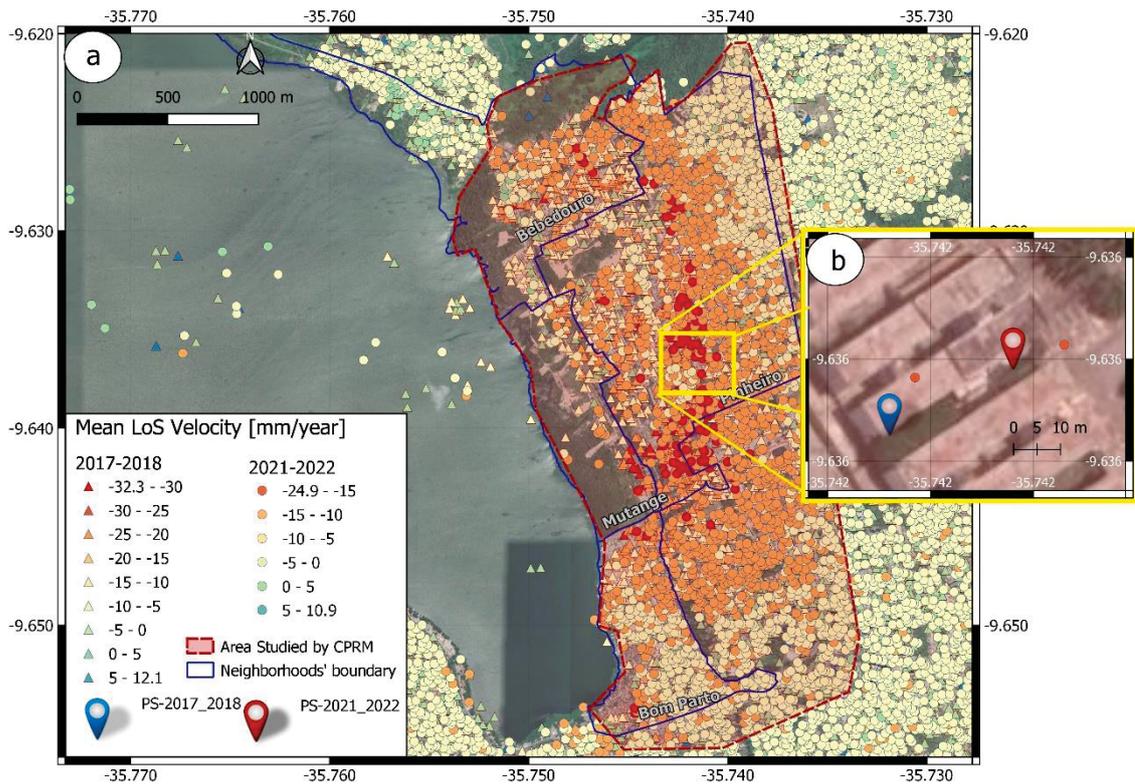


Fonte: O autor (2023).

Sendo a-1) e b-1) mostram a distribuição espacial dos resultados de 2017 a 2018 e 2021-2022, respectivamente, e a-2) e b-2) mostram as áreas onde ocorreram subsidências em 2017-2018 e 2021-2022, respectivamente

A Figura 28 apresenta a distribuição de PS em todo o bairro e seus arredores, com triângulos e círculos representando, respectivamente, os resultados de 2017 a 2018 e 2021 a 2022. É importante notar que a seção de pesquisa do CPRM apresentou a maioria dos PS com velocidades negativas, que são representados pelas cores amarela, laranja e vermelha. A densidade desses PS na região de estudo foi de 591,877 PS/km<sup>2</sup> de 2017 a 2018 e 421,958 PS/km<sup>2</sup> de 2021 a 2022.

Figura 29 - Distribuição dos PS entorno do bairro Pinheiro.



Fonte: O autor (2023).

a) mostra a distribuição de PS com taxa de deslocamento negativa; b) mostra a localização de dois PS onde foi detectada subsidência (PS-2017–2018 e PS-2021–2022).

A Tabela 14 contém uma lista dos intervalos mostrados na Figura 29a (intervalos adotados para classificar os PS, vide legenda da Figura 29a). De acordo com essas informações, foram encontrados um total de 53 PS nos intervalos de -32,3 a -30 e -30 mm/ano a -25 mm/ano nos anos de 2017–2018; porém, no mesmo intervalo, nenhum PS foi identificado em 2021–2022. Em comparação, 14 PS tiveram um deslocamento entre -25 e -20 mm/ano em 2021–2022 e 163 PS em 2017–2018. Com essas evidências, pode-se inferir que o bairro Pinheiro experimentou taxas de deslocamento significativamente maiores em 2017-2018; no entanto, processo semelhante foi percebido em 2021-2022, embora com menor amplitude na taxa de deslocamento em LoS.

Tabela 14 - Resumo dos PS classificados nos intervalos definidos na Figura 29.

Interval (mm/yr)	Total PS		Min LoS Velocity (mm/yr)		Max LoS Velocity (mm/yr)		Mean Velocity in LoS (mm/yr)		Standard Deviation	
	2017-2018	2021-2022	2017-2018	2021-2022	2017-2018	2021-2022	2017-2018	2021-2022	2017-2018	2021-2022
-32.1 to -30	9	-	-32.312	-	-30.009	-	-30.982	-	0.736	-
-30 to -25	44	-	-28.535	-	-25.024	-	-26.701	-	1.058	-
-25 to -20	163	14	-24.952	-24.092	-20.004	-20.078	-22.009	-21.440	1.429	1.186
-20 to -15	326	82	-19.981	-19.794	-15.009	-15.002	-17.200	-16.767	1.246	1.395
-15 to -10	489	218	-14.955	-14.987	-10.025	-11.011	-12.871	-12.716	1.700	1.151
-10 to -05	782	926	-9.996	-10.991	-5.002	-5.011	-7.293	-7.396	1.420	1.646
-05 to 00	1018	969	-4.985	-4.999	-0.003	-0.006	-2.482	-2.897	1.410	1.333
00 to 05	479	157	0.016	0.002	4.972	4.861	1.543	1.434	1.207	1.185
05 to 10	26	12	5.035	5.068	9.876	9.4021	6.241	6.432	1.166	1.195
10 to 12.1	1	1	12.099	10.968	12.099	10.968	12.099	10.968	-	-

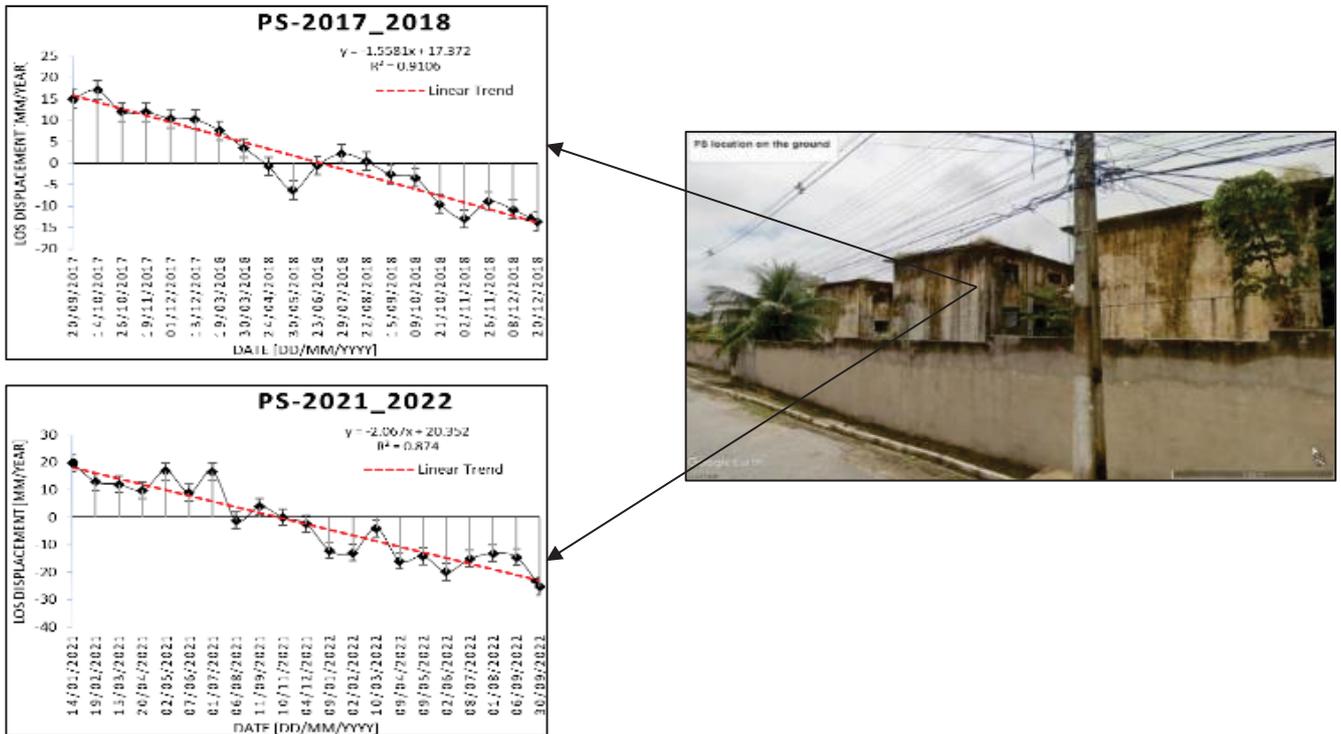
Fonte: O autor (2023).

Para as velocidades foram definidos intervalos a cada 5 mm/ano, partindo do menor valor de -32,1 mm/ano até o maior valor de 12,1 mm/ano, que foram obtidos em 2017–2018. A partir daí, obtemos as velocidades máxima e mínima de cada intervalo, bem como a média e o desvio padrão desses valores.

Para classificar a velocidade de subsidência, adotou-se a classificação de Varnes (1978). Varnes classifica a velocidade do movimento de massa como extremamente lenta (16 mm/ano), muito lenta (0,016 m/ano - 1,6 m/ano), lenta (1,6 m/ano - 1,3 m/mês), média (13 m/mês - 1,8 m/h), rápido (1,8 m/h - 3 m/min), muito rápido (3 m/min - 5 m/s) e extremamente rápido (> 5 m /s). Com base nessa classificação, infere-se, conforme a Figura 29 e a Tabela 14, que no bairro Pinheiro a taxa de subsidência se enquadra na categoria muito lenta e, o entorno do bairro, tem velocidade extremamente lenta.

As séries temporais dos PS-2017-2018 (latitude -9,63588°, longitude -35,7419°) e PS-2021-2022 (latitude -9,63575°, longitude -35,7416°), que foram destacados na Figura 29b podem ser observadas na Figura 30. Os resultados sugerem que a área representada pelo PS-2017-2018 e PS-2021-2022 sofreu subsidência tanto em 2017-2018 quanto em 2021-2022. Outros PS do bairro Pinheiro mostram tendências semelhantes, com algumas áreas exibindo mais deformações do que outras.

Figura 30 - Séries temporais de PS-2017-2018 e PS-2021-2022.



Fonte: O autor (2023).

A linha vermelha representa a tendência linear da deformação do objeto. A imagem do lado direito mostra a localização do PS.

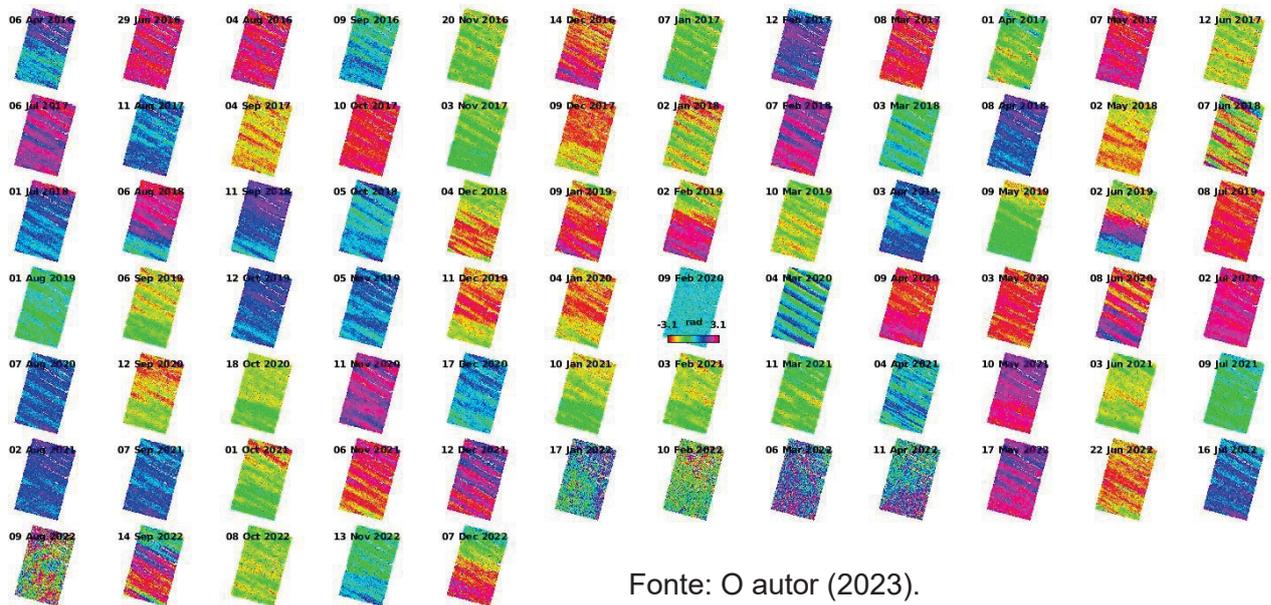
Alguns estudos foram desenvolvidos na região apresentada na Figura 29a. A CPRM (2020) detectou uma velocidade de -187,99 a -72 mm/ano em 2016–2018 e -235,7 a -100 mm/ano em 2018–2019. Euillades et al. (2020) empregaram a abordagem SBAS usando 81 imagens SLC-SAR adquiridas pelo Sentinel 1 (04/2015 e 5/2019) e identificaram uma taxa de subsidência que variou de 20 a -20 mm/ano. Vassileva et al. (2021) mediram o deslocamento da superfície nos últimos 16 anos usando a técnica DInSAR multitemporal (SBAS); os autores ignoraram o componente horizontal e converteram o deslocamento LoS em componentes apenas verticais e, em seguida, identificaram um deslocamento que se intensificou gradualmente para aproximadamente 10 cm/ano em 2007-2008 e atingiu aproximadamente 12 cm/ano em 2010-2011; no segundo período da cobertura dos dados SAR, que se estende de 03/2015 a 11/2020, eles encontraram uma velocidade inicial de subsidência de aproximadamente 12 cm/ano (2015–2016). Contudo, no estudo realizado com o processamento PSInSAR™ descrito nessa seção, detectou-se taxas de deslocamento de -32,312 mm/ano em 2017–2018 e -24,092 mm/ano em 2021–2022; no entanto, eles estavam na direção de LoS.

## 5.2 RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA-B

### 5.2.1 Processamento PSInSAR™ do Período de 2016-2022

A análise do processamento PSInSAR™ seguiu os mesmos procedimentos adotados na seção 5.2. Os interferogramas foram gerados utilizando o SNAP na etapa de pré-processamento das imagens SLC-SAR. A Figura 31 apresenta os 77 interferogramas diferenciais com as fases não desdobradas.

Figura 31 - Interferogramas diferenciais das Imagens SLC-SAR do período de 2016-2022 (sem desdobramento da fase).

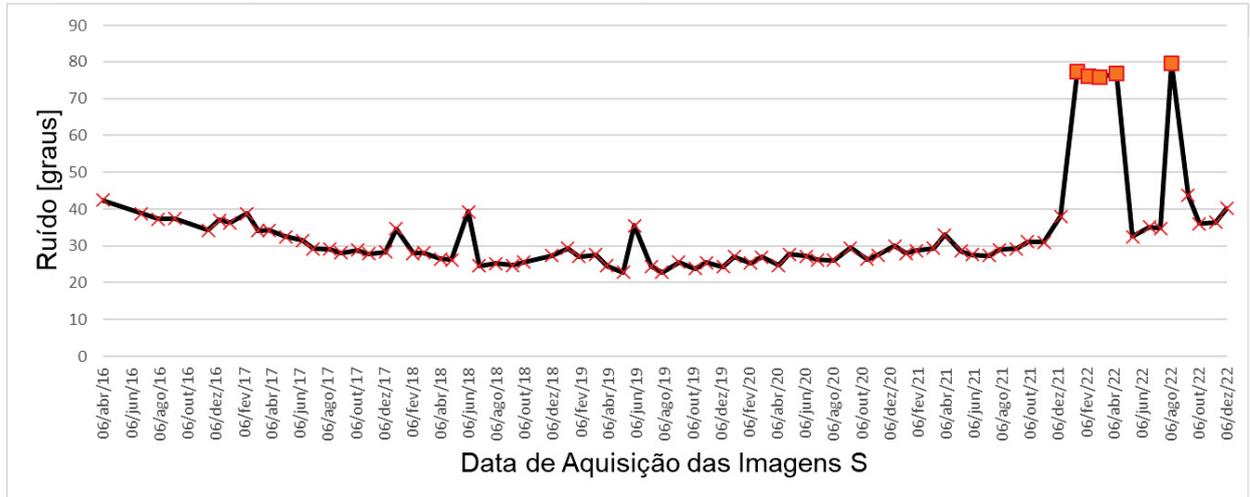


O gráfico apresentado na Figura 32 exibe a distribuição dos ruídos nos interferogramas diferenciais. Observa-se que cinco interferogramas apresentaram ruídos acima de 70 graus: os interferogramas das imagens das datas 17-jan-2022 ( $77,355^\circ$ ), 10-fev-2022 ( $76,128^\circ$ ), 06-mar-2022 ( $75,850^\circ$ ) e 09-ago-2022 ( $79,655^\circ$ ). Esses interferogramas devem ser retirados e o processamento deve continuar com novos interferogramas. O ruído desses interferogramas pode advir de várias fontes, como erro na aplicação das órbitas precisas nas imagens ou questões atmosféricas na data em que foram obtidas.

A obtenção dos interferogramas exige a repetição de todas as etapas de pré-processamento no ambiente do SNAP. Ao processar uma pilha de imagens, como neste teste, que continha 77 imagens, isso pode demandar um tempo considerável de processamento. No caso deste teste específico, o processamento levou cerca de 30

dias. O tempo necessário pode variar dependendo da configuração do computador – neste processamento, em particular, utilizou-se um computador pessoal com 16 GB de memória RAM (*Random Access Memory*) e um processador Intel Core i7 de 8ª geração.

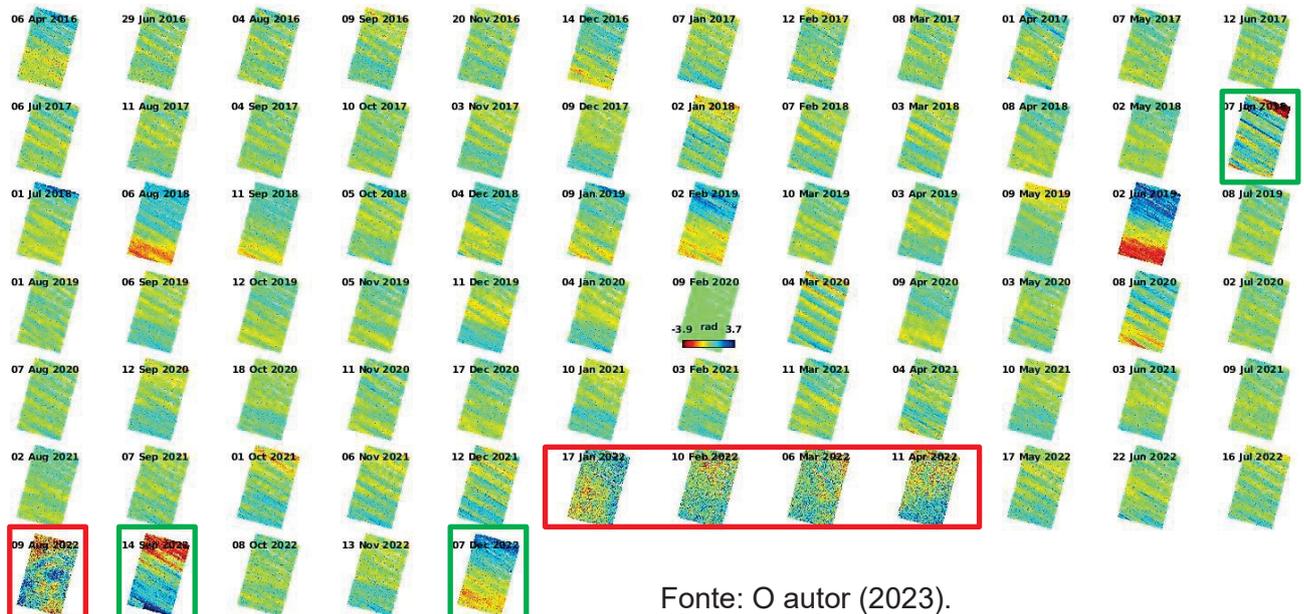
Figura 32 - Ruídos dos Interferogramas do Processamento 2016-2022.



Fonte: O autor (2023).

Como parte do teste, realizou-se o desdobramento da fase e o resultado pode ser observado na Figura 33. Nota-se que os interferogramas que apresentaram ruídos acima de 70° estão destacados pelos retângulos vermelhos. Os interferogramas destacados pelos retângulos verdes representam aqueles que apresentaram ruídos de aproximadamente 40°. Os interferogramas ruidosos apresentam uma estrutura granulosa em comparação com os demais interferogramas, que, de modo geral, exibem franjas ao longo da imagem.

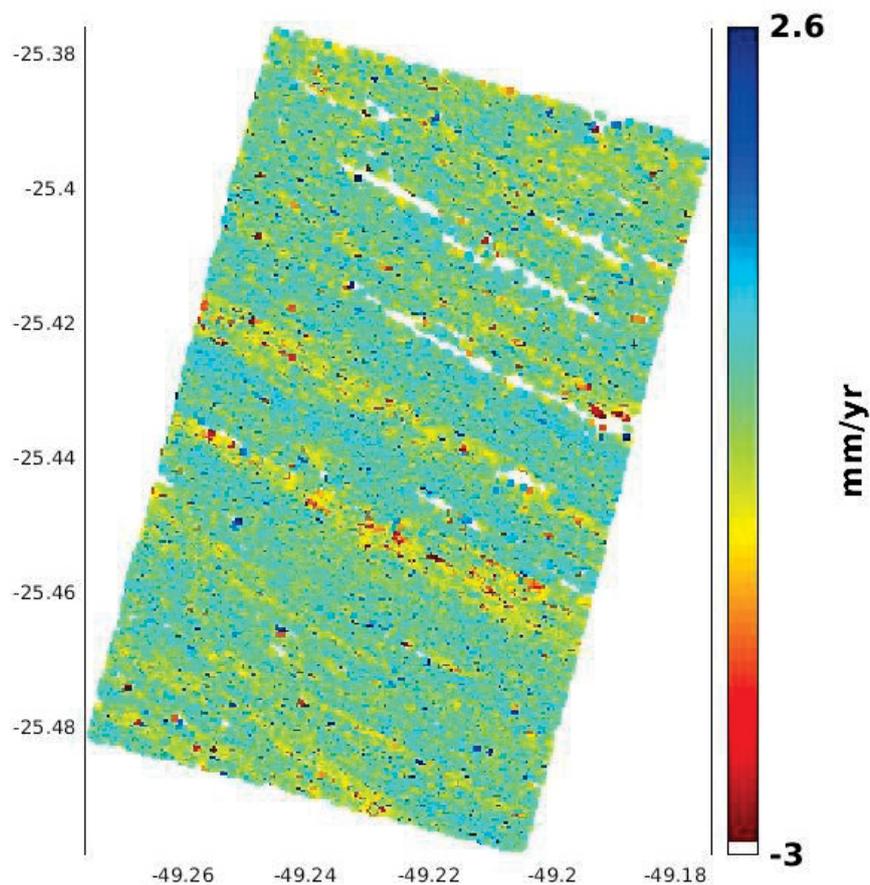
Figura 33 - Interferogramas diferenciais das Imagens SLC-SAR do período de 2016-2022 (com a fase desdobrada).



Fonte: O autor (2023).

O resultado do processamento PSInSAR™ desse conjunto de imagens pode ser observado na Figura 34. Nota-se que é possível observar as franjas (conjunto de pixels que formam uma linha transversal na imagem) que apareceram nos interferogramas da Figura 33. Acredita-se que essas franjas possam representar fases que não foram adequadamente modeladas, como, por exemplo, erros provenientes da contribuição da atmosfera, do MDT, órbita ou ruídos causados por fontes adversas (e.g., instrumental, temperatura). É possível que essas fases não tenham sido devidamente filtradas devido aos pixels ruidosos presentes nos interferogramas, conforme indicado pelos retângulos vermelhos na Figura 33.

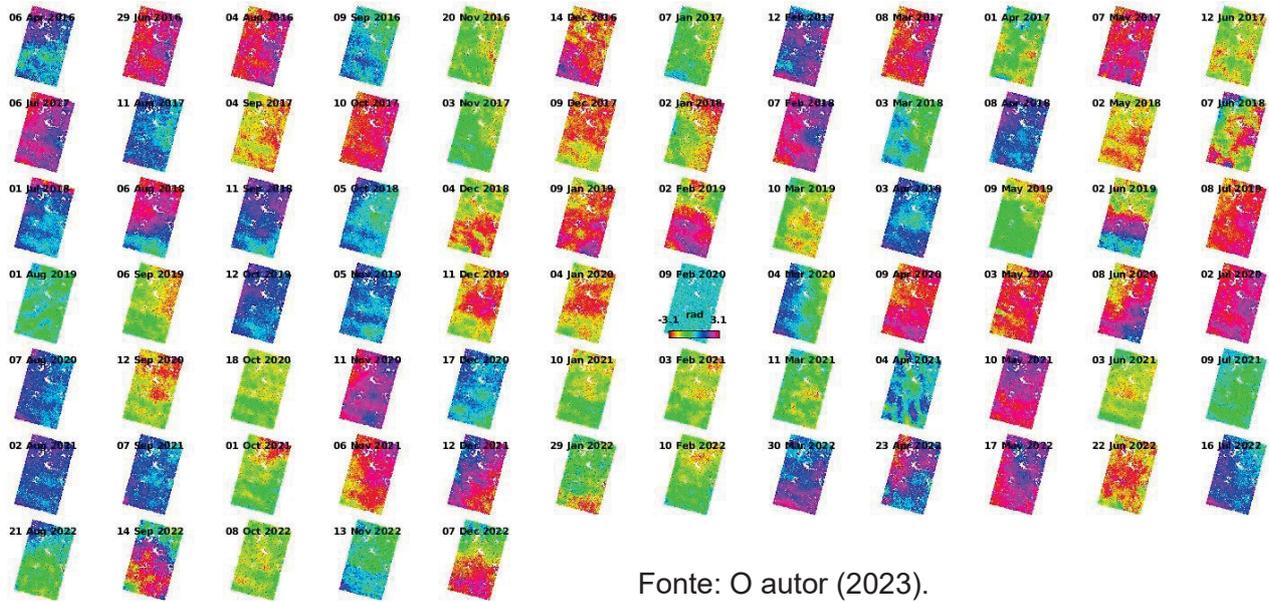
Figura 34 - Resultado do Processamento PSInSAR™ com os Interferogramas com Ruídos acima de 70°.



Fonte: O autor (2023).

Foi realizado um novo processamento com novas imagens SLC-SAR, substituindo as imagens ruidosas. Dessa forma, é possível observar os novos 77 interferogramas diferenciais, com as fases não desdobradas, na Figura 35.

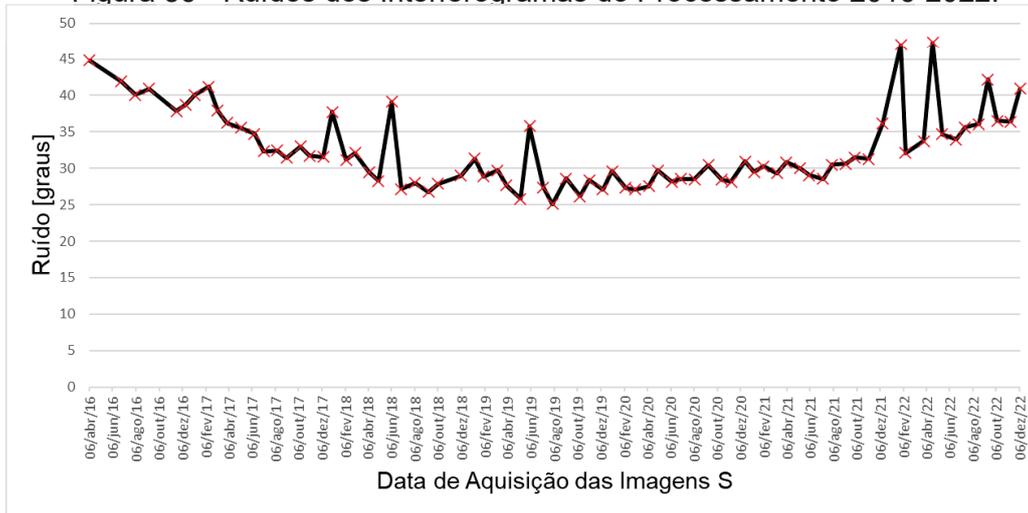
Figura 35 - Interferogramas diferenciais das Imagens SLC-SAR do período de 2016-2022 (sem desdobramento da fase).



Fonte: O autor (2023).

O gráfico apresentado na Figura 36 exibe a distribuição dos ruídos nos interferogramas diferenciais. Observa-se que nenhum interferograma apresentou ruídos acima de 70 graus, o que possibilitou o desdobramento da fase nesses interferogramas.

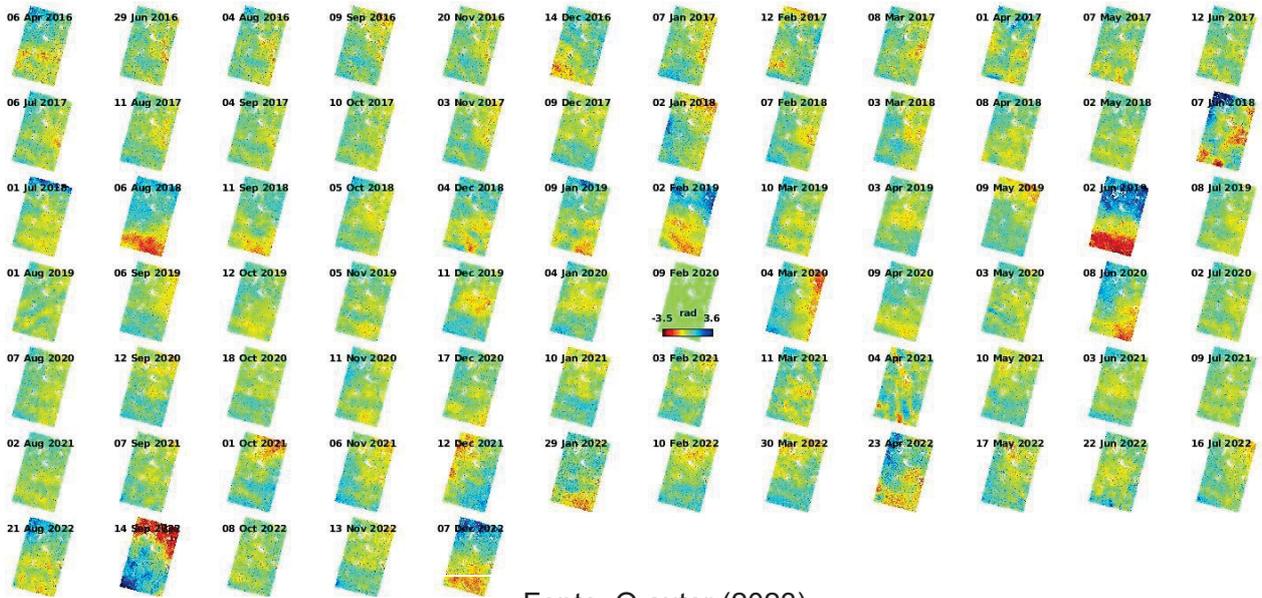
Figura 36 - Ruídos dos Interferogramas do Processamento 2016-2022.



Fonte: O autor (2023).

Após a análise dos ruídos, gerou-se os interferogramas com as fases desdobradas. A Figura 37 apresenta o resultado obtido.

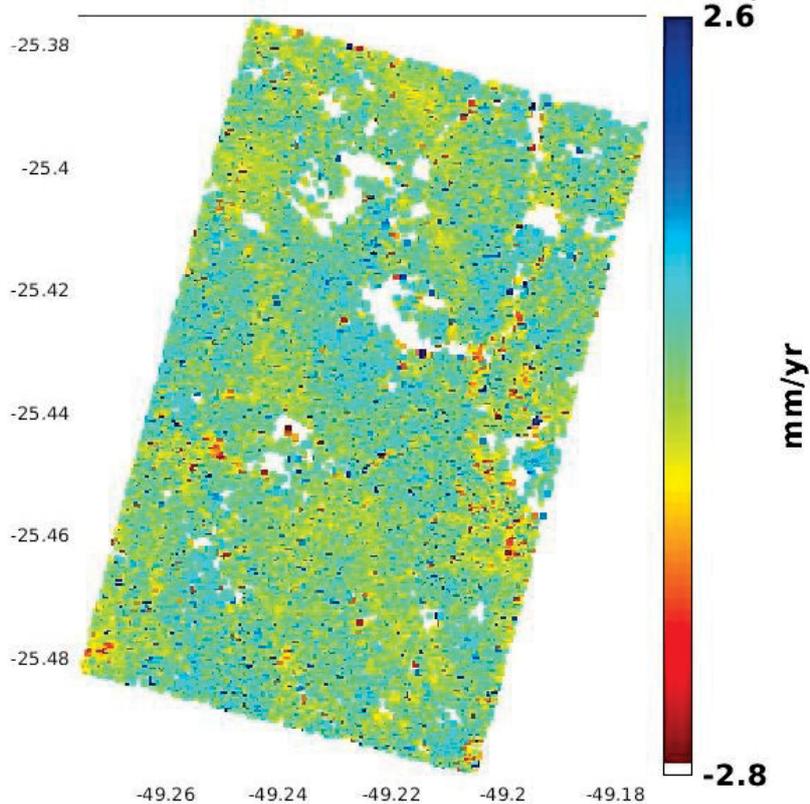
Figura 37 - Interferogramas diferenciais das Imagens SLC-SAR do período de 2016-2022 (com a fase desdobrada).



Fonte: O autor (2023).

A Figura 38 apresenta a distribuição dos PS selecionados sobre a área processada, recorte sobre o bairro do Guabirota. Esse resultado foi organizado em uma planilha e analisado no software QGIS. Os próximos parágrafos, que fazem parte do terceiro artigo (Anexo III – Resumo Artigo 3), discutem esses resultados.

Figura 38 - Resultado do Processamento Utilizando Novas Imagens SLC-SAR.

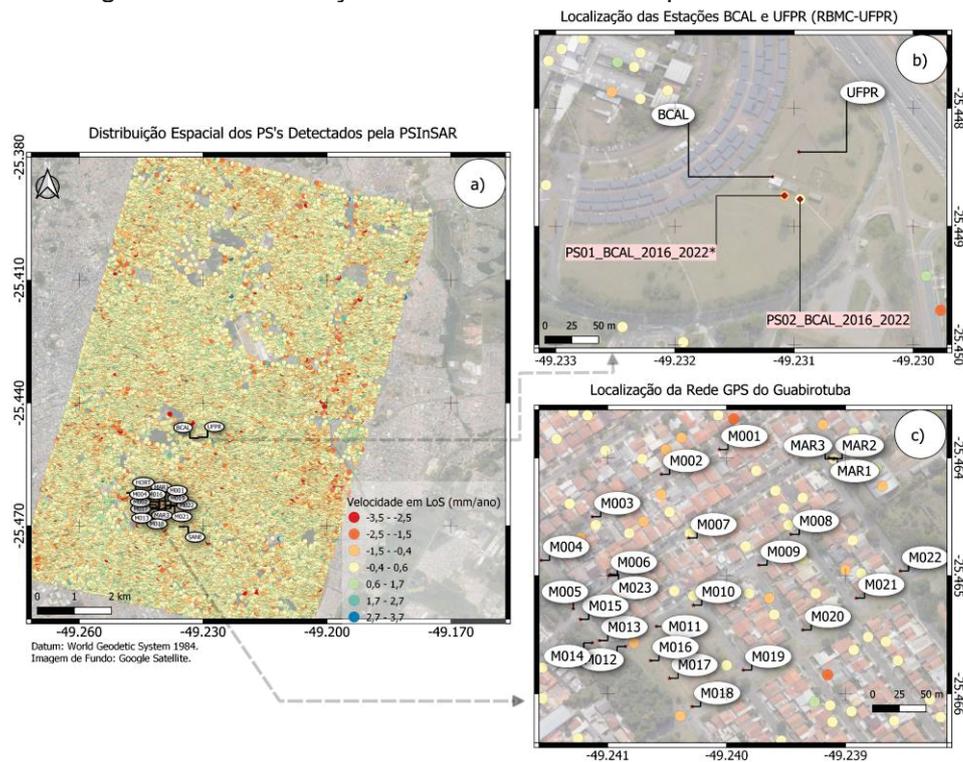


Fonte: O autor (2023).

O processamento PSInSAR™ no StaMPS obteve um total de 42173 PS em uma área de 102,425 km<sup>2</sup>, o que representa uma densidade de 412 PS/km<sup>2</sup>. Os PS identificados apresentaram velocidades mínimas e máximas de -3,538 mm/ano e 3,374 mm/ano, respectivamente, com um desvio padrão médio de  $\pm 0,457$  mm/ano.

A distribuição dos PS pode ser observada na Figura 39a, a qual indica que a maior parte deles foi detectada em áreas de construções ou solos expostos. Isso se justifica pelo fato de que a técnica PSInSAR™ é capaz de selecionar pixels que mantiveram uma baixa decorrelação espacial e temporal, ou seja, objetos que não sofreram mudanças significativas em sua posição durante o período de 2016 a 2022. Além disso, as imagens SAR foram imageadas utilizando a banda-C do sistema do Sentinel-1, a qual possui limitações que impedem a detecção de PS com velocidades elevadas. Devido a essa limitação, a técnica PSInSAR™ não pôde detectar PS em áreas cobertas por vegetação ou estruturas que apresentam maior propensão a mudanças.

Figura 39 - Distribuição dos PS Identificados pela Técnica PSInSAR.



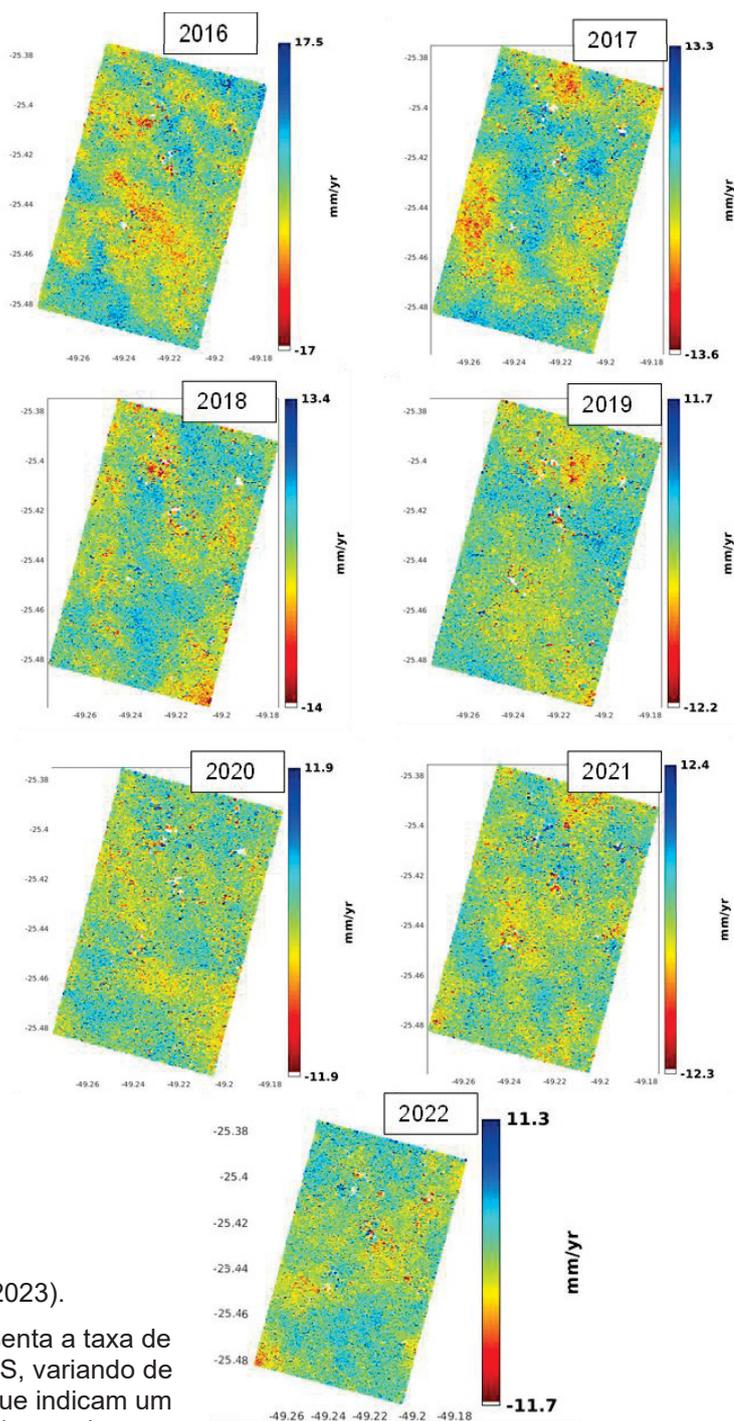
Fonte: O autor (2023).

Onde (a) apresenta a distribuição espacial dos PS detectados pela técnica PSInSAR; (b) destaca dois PS próximos à estação BCAL e RBMC-UFPR, que ficam uma distância média de 30m; (c) exibe a rede GPS do bairro do Guabirota e a distribuição espacial dos PS identificados próximos às estações GPS.

### 5.2.2 Processamento PSInSAR™ para os anos de 2016 a 2022

O processamento dos anos individuais seguiu a mesma metodologia empregada no processamento do conjunto de imagens SLC-SAR no período de 2016-2022. Nesse sentido, foram utilizados apenas os interferogramas que apresentaram ruído abaixo de  $70^\circ$ . O resultado desses processamentos pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 - Resultado do Processamento dos anos de 2016 a 2022.



Fonte: O autor (2023).

A escala de cores representa a taxa de deslocamento de cada PS, variando de velocidades negativas, que indicam um movimento de subsidência, a valores positivos, que indicam um processo de elevação na direção da LoS.

Nota-se que, diferentemente da Figura 38, onde a velocidade dos PS variou de -2,8 a 2,6 mm/ano, os resultados obtidos na Figura 40 mostram uma variação de velocidade maior. No ano de 2016, essa variação, por exemplo, foi de -17 a 17,5 mm/ano, enquanto no ano de 2022 foi de -11,7 a 11,3 mm/ano. No processamento de 2016-2022, foi obtido um total de 42173 PS em uma área de 102,425 km<sup>2</sup>, o que representa uma densidade de 412 PS/km<sup>2</sup>. Observa-se que, no processamento dos anos individuais, a quantidade de PS por km<sup>2</sup> aumentou, conforme observado na Tabela 15.

Tabela 15 - Quantitativo de PS identificados nos Processamentos dos anos de 2016 a 2022.

Ano	Número PS	PS/km <sup>2</sup>
2016	66721	651
2017	64640	631
2018	64946	634
2019	64792	633
2020	62859	614
2021	62029	606
2022	63210	617

Fonte: o autor (2023).

No período de 2016-2022, foram processadas 77 imagens adquiridas ao longo desses sete anos, sendo considerada a imagem obtida em 09/02/2020 (vide Figura 18) como imagem mestre. Nesse processo, a linha de base temporal entre uma imagem S e a imagem M chegou a ter uma diferença de até 4 anos. Isso significa que um pixel detectado na imagem S poderia apresentar ruído na imagem M e, por esse motivo, seria descartado ao analisar a pilha dos interferogramas. Esse ruído pode ter origem devido às mudanças causadas em estruturas durante um determinado período dentro desses 7 anos. Por outro lado, ao diminuir a linha de base temporal, como ocorre no processamento anual, em que o intervalo máximo entre uma imagem M e S foi de 6 meses, tornou-se possível detectar um maior número de pixels.

No que diz respeito aos diferentes valores de velocidade entre o processamento anual e o processamento do período completo, é possível supor alguns fatores que podem ter influenciado os resultados. Ao utilizar um conjunto extenso de imagens, como no processamento de 2016-2022, a PSInSAR™ pode ter uma melhor capacidade de determinar a fase que descreve o movimento do objeto. Isso ocorre devido à abundância de informações que auxiliam na modelagem mais precisa das fases da atmosfera e do terreno, por exemplo. No entanto, ao utilizar um

conjunto menor de imagens e, conseqüentemente, um número reduzido de pixels nos interferogramas, é possível otimizar o processamento.

### 5.3 RESULTADOS OBTIDOS EMPREGANDO OS PROCEDIMENTOS DEFINIDOS NA ETAPA-C

#### 5.3.1 Comparação entre as Velocidades obtidas pela PSInSAR™ e o GPS – Resultado Processamento 2016-2022

Cerca de 50 PS foram detectados próximo à rede do Guabirotuba (Figura 39c), com velocidades médias variando de -2,5 a 0,6 mm/ano. No entanto, nem todas as estações possuíam PS próximos, o que levou à seleção apenas das estações com PS localizados a uma distância máxima de 20 metros (conforme indicado na Tabela 16). As velocidades GPS apresentadas na Tabela 16 foram obtidas a partir do processamento realizado por Amagua et al. (2022) e são relativas à estação RBMC-UFPR. Observa-se que o PS mais próximo à estação BCAL (~30m de distância), o PS01\_BCAL\_2016\_2022\*, apresentou uma velocidade em LoS de -0,47 mm/ano com a técnica PSInSAR™, enquanto registrou velocidades de 1,376 mm/ano e 1,406 mm/ano usando as projeções 3D e 1D, respectivamente, conforme a Eq. (15) e Eq. (16). Em geral, as velocidades obtidas pela PSInSAR™ ou projeções 3D/1D foram classificadas como extremamente lentas (vide Tabela 9), exceto para a estação M018, que apresentou uma velocidade de -32,218 mm/ano usando a projeção 3D, mas com grande influência da coordenada norte; no entanto, ao utilizar apenas a coordenada vertical, a velocidade foi de -6,607 mm/ano, contra velocidade de -0,63 mm/ano obtida pela PSInSAR™.

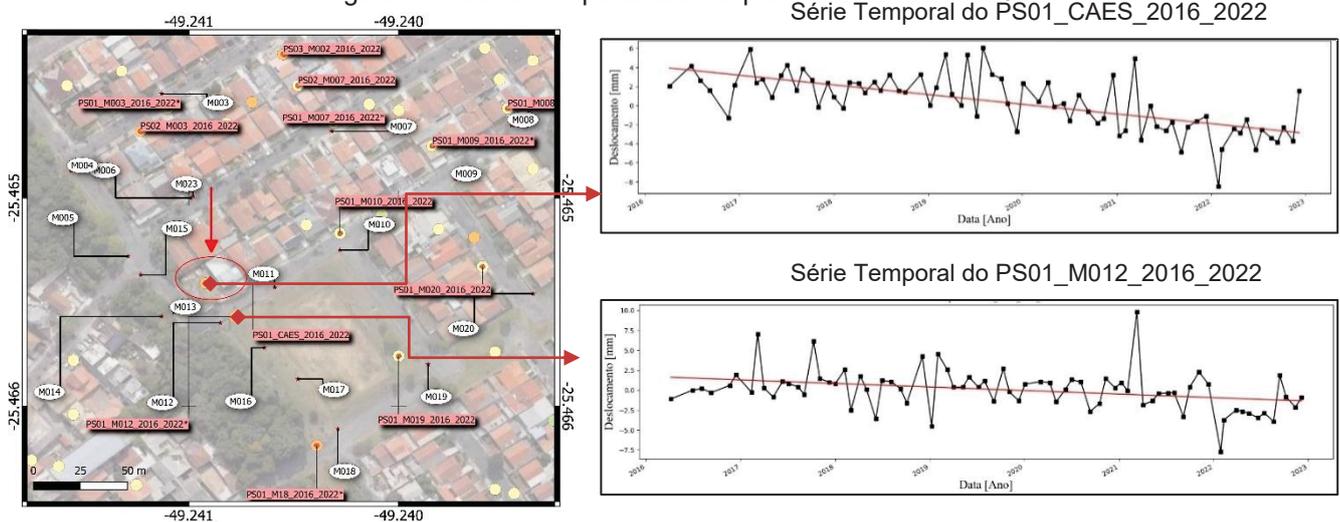
Tabela 16 - Velocidades Relativas das Estações da Rede Guabirotuba.

Estação	Leste (east)	Norte (north)	Vertical (up)	PSInSAR	GPS em LoS (3D)	GPS em LoS (1D)
	Velocidade $\pm \sigma$ [mm/ano]	Velocidade [mm/ano]	Velocidade [mm/ano]			
BCAL	-0,04 $\pm$ 0,27	0,02 $\pm$ 0,28	1,9 $\pm$ 1,16	-0,47 $\pm$ ,48	1,376	1,406
M002	0,49 $\pm$ 1,12	-0,86 $\pm$ 1,22	-1,71 $\pm$ 6,6	0,15 $\pm$ 0,79	-0,818	-1,265
M003	-0,34 $\pm$ 1,14	-3,4 $\pm$ 1,18	-1,27 $\pm$ 6,12	0,12 $\pm$ 0,62	-0,667	-0,940
M007	-2,4 $\pm$ 0,96	6,64 $\pm$ 1,01	-3,54 $\pm$ 5,11	0,19 $\pm$ 0,58	-5,164	-2,619
M008	-1,21 $\pm$ 0,9	-1,6 $\pm$ 0,89	-4,15 $\pm$ 5,16	-0,18 $\pm$ ,37	-3,631	-3,070
M009	-1,11 $\pm$ 0,71	-1,82 $\pm$ 0,8	-3,37 $\pm$ 3,37	0,51 $\pm$ 0,82	-2,957	-2,493
M010	-1,46 $\pm$ 0,7	-4,51 $\pm$ 0,7	-3,81 $\pm$ 3,66	0,26 $\pm$ 0,24	-3,119	-2,819
M012	-11,06 $\pm$ 3,98	4,21 $\pm$ 3,76	-4,09 $\pm$ 21,47	-0,45 $\pm$ 0,12	-10,904	-3,026
M018	-50,63 $\pm$ 3,3	-52,35 $\pm$ 3,07	-8,93 $\pm$ 18,47	-0,63 $\pm$ 0,87	-32,218	-6,607
M019	-1,75 $\pm$ 0,78	-0,75 $\pm$ 0,82	-1,83 $\pm$ 3,99	-0,04 $\pm$ 0,71	-2,394	-1,354
M020	-7,25 $\pm$ 18,09	2,85 $\pm$ 17,22	10,16 $\pm$ 97,41	-0,34 $\pm$ 0,35	2,339	7,517
M021	-1,08 $\pm$ 1,38	3,28 $\pm$ 1,53	4,99 $\pm$ 7,39	-0,35 $\pm$ 0,55	2,504	3,692
MAR3	1,68 $\pm$ 2,6	-1,73 $\pm$ 2,81	21,17 $\pm$ 14,6	-0,73 $\pm$ 0,74	17,018	15,662

Fonte: Adaptada de Amagua et al. (2022).

A Figura 41 apresenta a localização da construção afetada pelo processo de subsidência descrito na Figura 10. Na região, dois PS foram identificados: o PS01\_CAES\_2016\_2022, indicado pela seta vermelha, e o PS01\_M012\_2016\_2022, próximo à estação M012. Os resultados indicam que o primeiro ponto apresentou uma taxa de subsidência de  $-1,03$  mm/ano, enquanto o segundo exibiu um processo extremamente lento, com velocidade de  $-0,45$  mm/ano. A estação M012 também foi avaliada utilizando projeções em LoS, que detectaram velocidades de  $-10,904$  mm/ano e  $-3,026$  mm/ano, respectivamente, para as projeções 3D e 1D. No geral, a velocidade foi classificada como "extremamente lenta", conforme indicado na Tabela 9.

Figura 41 - Série Temporal dos PS próximos ao Marco M012.



Fonte: O autor (2023).

O mapa a esquerda apresenta a localização de alguns PS em relação aos marcos da Rede GPS do Guabirota. Os gráficos à direita exibem as séries temporais de dois PS identificados próximos à construção que apresentou rachaduras na sua estrutura (vide Figura 10).

### 5.3.2 Comparação entre as Velocidades obtidas pela PSInSAR™ e o GPS – Resultado Processamento anual de 2016 a 2022

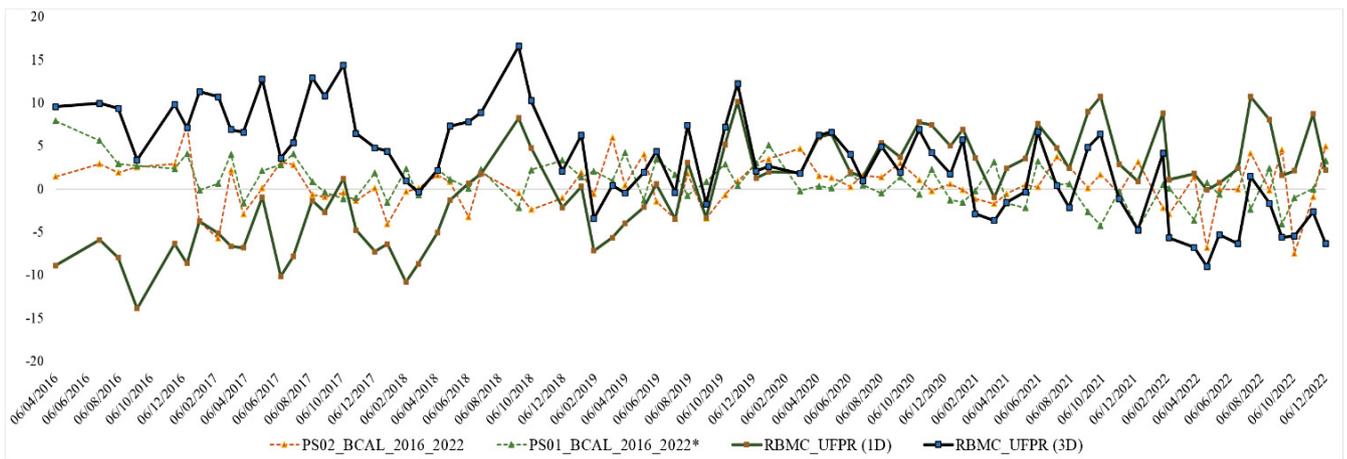
A Tabela 17 apresenta as velocidades em LoS de alguns PS próximos aos marcos BCAL, M007, M008, M012, M018, M021 e MAR3. Essa tabela mostra as taxas de deslocamento obtidas no processamento de 2016-2022, no processamento anual e no deslocamento GPS projetado em LoS (consulte a Tabela 16). Por exemplo, o marco M012 apresentou taxas de deslocamento negativas em todos os processamentos PSInSAR™, atingindo um valor máximo de  $-5,68$  mm/ano em 2017, em comparação com  $-10,90$  e  $-3,026$  mm/ano na projeção GPS em LoS 3D e 1D,

respectivamente. Por outro lado, a BCAL apresentou velocidades positivas na maioria dos anos, exceto no processamento de 2016-2022 e no processamento de 2019. O marco M018 registrou velocidades de  $-32,22$  mm/ano e  $-6,607$  mm/ano na projeção GPS 3D e 1D, respectivamente, enquanto no processamento PSInSAR™ a velocidade máxima negativa foi de  $-7,47$  mm/ano em 2017, indicando uma concordância aproximada com os resultados do GPS em LoS (1D).

### 5.3.3 Comparação entre as Séries Temporais da Estação RBMC-UFPR e PS vizinhos – Processamento 2016-2022

Nessa etapa foi realizado uma comparação entre as séries temporais da estação RBMC-UFPR e os PS mais próximos detectados pela técnica PSInSAR™.

Figura 42 - Série Temporal dos PS e da Estação RBMC-UFPR



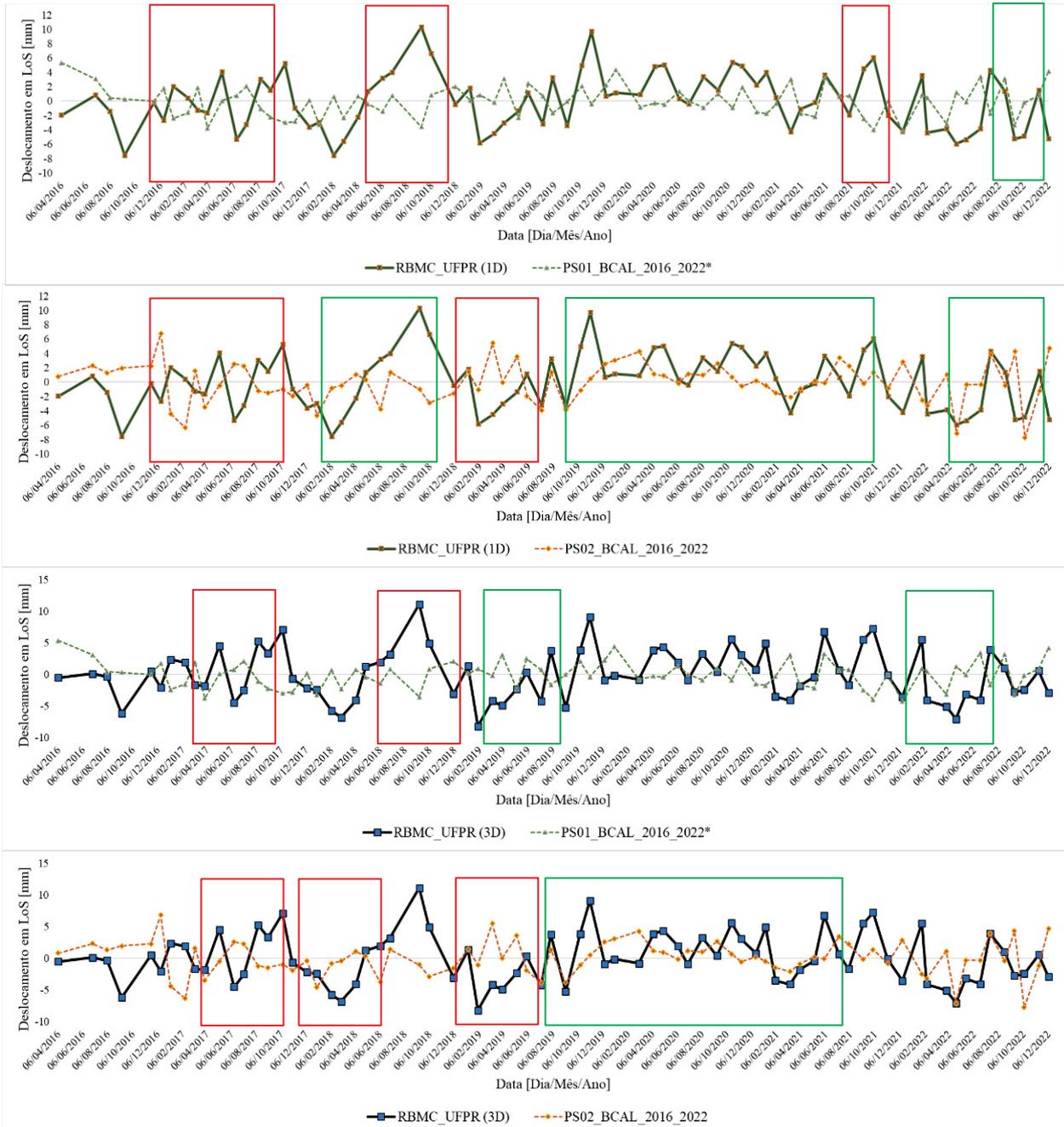
Fonte: O autor (2023).

Para essa comparação, foram considerados os PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, conforme mostrado na Figura 39b, sendo que o PS01\_BCAL\_2016\_2022\* está mais próximo da estação UFPR. Nesse sentido, utilizou-se a data da imagem M como referência (09/02/2020), calculou-se o deslocamento das coordenadas (*north, east, up*) da estação RBMC-UFPR e, em seguida, gerou-se as séries temporais. A Figura 42 apresenta as séries temporais dos PS01\_BCAL\_2016\_2022\*, PS02\_BCAL\_2016\_2022 e das coordenadas locais da estação RBMC-UFPR projetadas em LoS.

Através da análise da Figura 42, é possível observar uma tendência crescente ou decrescente tanto nas séries temporais dos PS quanto na série temporal da

estação RBMC-UFPR. Com o intuito de torná-las comparáveis, removeu-se a tendência de cada série, resultando nas séries temporais apresentadas na Figura 43.

Figura 43 - Série Temporal dos PS e da Estação RBMC-UFPR sem Tendência



Fonte: O autor (2023).

Sendo (a) e (b) apresentam as séries temporais da estação RBMC-UFPR(1D) usando a Eq. (16) com os PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, respectivamente; (c) e (d) exibem as séries temporais da estação RBMC-UFPR(3D), empregando a Eq. (15), com os PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, respectivamente.

Ao analisar a Figura 43a, é possível notar que a série temporal gerada pelo PS01\_BCAL\_2016\_2022\* apresentou, em alguns momentos, um comportamento

oposto ao da série gerada pela coordenada *up* em LoS da estação RBMC-UFPR (1D). Esse comportamento de inversão pode ser observado nas demais séries, como evidenciado pelos retângulos vermelhos. Conforme apresentado na Tabela 18, essas duas séries temporais apresentaram uma correlação de -0,443. Isso indica uma correlação negativa, onde uma série decresce enquanto a outra cresce.

Na Figura 43b, que compara as séries PS02\_BCAL\_2016\_2022 e RBMC-UFPR (1D), também ocorreram problemas semelhantes aos identificados na Figura 43a. No entanto, em outros períodos, como indicado pelo retângulo verde, elas demonstraram comportamentos similares, resultando em uma correlação de -0,381 entre elas.

Ao analisar equitativamente a série da RBMC-UFPR (3D) em comparação com as séries do PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, foram identificados os mesmos problemas observados nas séries apresentadas nas Figura 43a e b. Isso sugere que, neste contexto específico, após a remoção das tendências das séries, as projeções das coordenadas (*north*, *east*, *up*) na LoS, tanto utilizando a projeção 3D quanto a 1D, resultaram em resultados similares. As duas séries demonstraram uma correlação de -0,463 e -0,415, respectivamente, em relação à RBMC-UFPR (3D).

Através da Figura 43, é possível notar que as duas séries geradas pelas técnicas utilizadas apresentaram, em alguns momentos, comportamentos semelhantes, mas em outros momentos houve divergência. É importante salientar que as coordenadas da estação RBMC-UFPR foram obtidas através do método PPP, o qual apresenta uma precisão na casa dos centímetros, enquanto a técnica PSInSAR™ é capaz de detectar deslocamentos na casa dos milímetros, porém estar suscetível a erros tais como os erros de órbita, do modelo digital do terreno empregado para modelar a fase do terreno e o efeito da atmosfera em cada imagem SAR. Além disso, o processo de compatibilização dos deslocamentos envolveu o uso do ângulo de incidência médio do terreno e o ângulo azimutal do satélite na época de aquisição da imagem M, ao invés de informações específicas da própria imagem S. Devido a esses fatores, não seria realista esperar que os comportamentos das duas séries fossem totalmente equivalentes. No geral, foi possível realizar uma análise comportamental da área de estudo, mas é importante levar em consideração as limitações e fontes de erro das técnicas utilizadas.

Os valores da Tabela 18 representam a correlação de Pearson entre pares de variáveis. Os valores variam de -1 a 1, onde -1 indica uma correlação negativa perfeita (ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui em perfeita proporção), 0 indica ausência de correlação linear e 1 indica uma correlação positiva perfeita (ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta em perfeita proporção). Nesse sentido, verificou-se que as variáveis RBMC\_UFPR (1D) e RBMC\_UFPR (3D) possuem uma forte correlação positiva (0,982), o que indica que elas se movem juntas na mesma direção. Já as variáveis PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022 possuem uma correlação positiva moderada (0,739), indicando que elas também se movem juntas, mas em menor intensidade. Além disso, observa-se uma correlação negativa moderada entre as variáveis RBMC\_UFPR (1D) e PS01 BCAL 2016 2022, e entre as variáveis RBMC UFPR (3D) e

Tabela 18 - Matriz de Correlação entre as Séries Temporais.

<b>Matriz de Correlação</b>				
	RBMC_UFPR(1D)	RBMC_UFPR(3D)	PS01_BCAL_2016_2022*	PS02_BCAL_2016_2022
RBMC_UFPR(1D)	1			
RBMC_UFPR(3D)	0,982	1		
PS01_BCAL_2016_2022*	-0,443	-0,463	1	
PS02_BCAL_2016_2022	-0,381	-0,415	0,739	1

Fonte: O autor (2023).

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O propósito central desta pesquisa foi investigar os fenômenos de subsidência em ambientes urbanos por meio da aplicação da interferometria diferencial em imagens SAR, adotando uma abordagem multitemporal, com particular destaque para a técnica PSInSAR™. Concentrou-se em explorar a capacidade dessa abordagem para elucidar os padrões de subsidência em duas localidades distintas: o bairro Pinheiro, em Maceió, e o bairro Guabirota, em Curitiba.

No caso do bairro Pinheiro, constatou-se que a aplicação da técnica PSInSAR™ revelou-se altamente eficaz na detecção e quantificação das taxas de subsidência. Mesmo diante de desafios como um evento sísmico, essa abordagem demonstrou uma notável precisão em identificar e mapear os movimentos de subsidência. A análise indicou velocidades médias de subsidência classificadas como lentas, enquanto as áreas circundantes exibiram um comportamento ainda mais sutil, categorizado como extremamente lento.

Na área do bairro Guabirota, os resultados evidenciaram uma subsidência caracterizada por velocidades extremamente lentas. Essa observação pode ser atribuída a fatores geológicos específicos do terreno ou a variações sazonais. Ao comparar os resultados provenientes da técnica PSInSAR™ com aqueles obtidos pela estação RBMC-UFPR, observou-se comportamentos tanto convergentes quanto divergentes em várias localizações. É importante mencionar que, embora ambas as abordagens sejam capazes de identificar tendências nos deslocamentos, a baixa correlação nos deslocamentos na direção LoS entre as técnicas destaca suas diferentes metodologias e a falta de correspondência direta dos pontos de análise no terreno. Contudo, para trabalhos futuros, recomenda-se a comparação dos deslocamentos relativos dos PS obtidos no processamento PSInSAR™ com os deslocamentos relativos computados por meio das coordenadas provenientes do processamento dos dados GPS utilizando o método relativo, em vez do método PPP, que é o método empregado no processamento dos dados GPS pelo NGL.

No entanto, é fundamental destacar que essa correlação reduzida não implica superioridade ou inferioridade intrínseca entre as técnicas. A escolha da abordagem apropriada deve ser norteadas pelos objetivos específicos do estudo e pelas características particulares da área analisada. Além disso, a consideração cuidadosa dos dados geológicos e geotécnicos é essencial para interpretar com precisão as

informações obtidas por meio das técnicas de monitoramento. Somente com essa abordagem abrangente, é possível conduzir uma avaliação sólida e confiável da estabilidade do terreno, oferecendo uma base sólida para decisões relacionadas ao planejamento e gerenciamento das áreas afetadas.

Uma abordagem promissora para estudos subsequentes seria a análise da confiabilidade do método por meio de comparações com o nivelamento topográfico. Além disso, explorar a concordância entre a série temporal de resultados da técnica PSInSAR™ e os obtidos a partir de um processamento GNSS utilizando o método relativo-estático, poderia proporcionar uma compreensão mais holística dos fenômenos em evolução.

Outra sugestão seria investigar a utilização da técnica SBAS em conjunto com a PSInSAR™. A abordagem SBAS, ao considerar um subconjunto de linhas de base mais curtas, poderia mitigar o impacto da decorrelação temporal e espacial nos pixels. Essa integração poderia oferecer uma análise mais robusta e precisa dos deslocamentos, minimizando a exclusão de pixels relevantes.

Destaca-se, também, a importância do avanço contínuo das técnicas de sensoriamento remoto e o acesso a acervos históricos de dados SAR. Esses avanços podem contribuir significativamente para aprimorar o monitoramento de deslocamentos superficiais e suas aplicações práticas. A integração de dados SAR com informações GNSS e de nivelamento pode enriquecer a compreensão dos fenômenos de subsidência, beneficiando áreas urbanas como o bairro Pinheiro em Maceió e o bairro Guabirota em Curitiba.

No contexto de Maceió, uma sugestão seria estabelecer uma rede GNSS integrada com informações de nivelamento para obter altitudes precisas dos marcos. Esses dados poderiam ser combinados com os processamentos interferométricos de dados SAR, permitindo uma avaliação mais abrangente do fenômeno de subsidência na região. A combinação dessas técnicas poderia fornecer uma análise mais detalhada e precisa dos deslocamentos superficiais, considerando tanto os deslocamentos verticais quanto horizontais.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABIDIN, H. Z.; DJAJA, R.; DARMAWAN, D.; et al. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its geodetic monitoring system. **Natural Hazards**, v. 23, n. 2–3, p. 365–387, 2001.
- AGRAM, P. S.; JOLIVET, R.; RIEL, B.; et al. New radar interferometric time series analysis toolbox released. **Eos**, v. 94, n. 7, p. 69–70, 2013. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2013EO070001>>. .
- ALATZA, S.; PAPOUTSIS, I.; PARADISSIS, D.; KONTOES, C.; PAPADOPOULOS, G. A. Multi-temporal inSAR analysis for monitoring ground deformation in Amorgos Island, Greece. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 2, p. 1–15, 2020.
- ALEMOHAMMAD, S. H.; KONINGS, A. G.; JAGDHUBER, T.; MOGHADDAM, M.; ENTEKHABI, D. Characterization of vegetation and soil scattering mechanisms across different biomes using P-band SAR polarimetry. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, n. February, p. 107–117, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.032>>. .
- ALVES, D. B. M.; ABREU, P. A. G. DE; SOUZA, J. S. GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 1, n. 1, p. 2, 2013.
- AMAGUA, C. G. P.; EURIQUES, J. F.; ALVES, S. DA C.; KRUEGER, C. P. Analysis of local surface displacement using repeated GPS measurements: a case study of the Guabirotuba area, Curitiba, Brazil. **Boletim de Ciências Geodesicas**, v. 28, n. 1, p. 0–3, 2022.
- ANDREAS, H.; ZAINAL ABIDIN, H.; GUMILAR, I.; et al. On the acceleration of land subsidence rate in Semarang City as detected from GPS surveys. **E3S Web of Conferences**, v. 94, 2019.
- ARIKAN, M.; HOOPER, A.; HANSSSEN, R. Radar Time Series Analysis Over West Anatolia. **Fringe 2009**, p. 1–6, 2009.
- ASLAN, G.; FOUMELIS, M.; RAUCOULES, D.; et al. Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) technique in the French alps. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, 2020.
- BEKAERT, D. P. S.; WALTERS, R. J.; WRIGHT, T. J.; HOOPER, A. J.; PARKER, D. J. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 170, p. 40–47, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035>>. .
- BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 11, p. 2375–2383, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1166596/>>. .
- BIANCHINI, S.; CIGNA, F.; RIGHINI, G.; PROIETTI, C.; CASAGLI, N. Landslide HotSpot Mapping by means of Persistent Scatterer Interferometry. **Environmental Earth Sciences**, v. 67, n. 4, p. 1155–1172, 2012.
- BLANCO-SÁNCHEZ, P.; MALLORQUÍ, J. J.; DUQUE, S.; MONELLS, D. The coherent pixels technique (CPT): An advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring. **Pure and Applied Geophysics**, v. 165, n. 6, p. 1167–1193, 2008.
- BLEWITT, G.; HAMMOND, W.; KREEMER, C. Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science. **Eos**, v. 99, 2018. Disponível em: <<https://eos.org/project-updates/harnessing-the-gps-data-explosion-for-interdisciplinary-science>>. .
- BOHANE, A. M.; OLIVEIRA, W. J. DE; PEDROSO, E. C.; et al. A utilização da tecnologia InSAR na caracterização da deformação superficial do terreno no campo petrolífero de Canto do Amaro-RN. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 2015**.

BOVENGA, F.; WASOWSKI, J.; NITTI, D. O.; NUTRICATO, R.; CHIARADIA, M. T. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 119, p. 272–285, 2012. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.013>>. .

CABRAL, J. J. DA S. P.; SANTOS, S. M. DOS; FILHO, I. D. DA S. P. Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência do Solo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 3, p. 147–157, 2006.

CENNI, N.; FIASCHI, S.; FABRIS, M. Monitoring of land subsidence in the Po river delta (Northern Italy) using geodetic networks. **Remote Sensing**, v. 13, n. 8, 2021.

CHEN, C. W.; ZEBKER, H. A. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms: erratum. **Journal of the Optical Society of America A**, v. 18, n. 5, p. 1192, 2000.

CHEN, C. W.; ZEBKER, H. A. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. **Journal of the Optical Society of America A**, v. 18, n. 2, p. 338, 2001.

CHEN, C. W.; ZEBKER, H. A. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 8, p. 1709–1719, 2002.

CHEN, F.; LIN, H.; LI, Z.; CHEN, Q.; ZHOU, J. Interaction between permafrost and infrastructure along the Qinghai-Tibet Railway detected via jointly analysis of C- and L-band small baseline SAR interferometry. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 532–540, 2012. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.020>>. .

CHEN, Y.; REMY, D.; FROGER, J. L.; et al. Long-term ground displacement observations using InSAR and GNSS at Piton de la Fournaise volcano between 2009 and 2014. **Remote Sensing of Environment**, v. 194, n. March 1998, p. 230–247, 2017. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.038>>. .

CHENDEB EL RAI, M.; SIMONETTO, E. PS-InSAR experiments for the analysis of urban ground deformation using StaMPS. **Image and Signal Processing for Remote Sensing XV**, v. 7477, n. September 2009, p. 74771J, 2009.

CHOUDHURY, P.; GAHALAUT, K.; DUMKA, R.; et al. GPS measurement of land subsidence in Gandhinagar, Gujarat (Western India), due to groundwater depletion. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 22, p. 1–5, 2018. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7966-5>>. .

CIAN, F.; BLASCO, J.; CARRERA, L. Sentinel-1 for Monitoring Land Subsidence of Coastal Cities in Africa Using PSInSAR: A Methodology Based on the Integration of SNAP and StaMPS. **Geosciences**, v. 9, n. 3, p. 124, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3263/9/3/124>>. .

COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. **Engineering Geology**, v. 68, n. 1–2, p. 3–14, 2003.

CPRM. Mapeamento das Rachaduras e do Afundamento. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Acoes-Especiais/Galeria-de-Imagens---Bairro-Pinheiro-5347.html>>. Acesso em: 29/12/2022.

CPRM. Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL). , v. III, p. 1–50, 2019.

CPRM. **Informativo Técnico nº 01/2020**. Maceió: Serviço Geológico do Brasil, 2020.

CROSETTO, M.; CRIPPA, B. State of the art of land deformation monitoring using differential SAR interferometry. **ISPRS Hannover ...**, 2005. Disponível em: <<http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/126-crosetto.pdf>>. .

CROSETTO, M.; DEVANTHÉRY, N.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; MONSERRAT, O.; CRIPPA, B. Exploitation of the full potential of PSI data for subsidence monitoring.

**Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 372, p. 311–314, 2015.

CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; DEVANTHÉRY, N.; CRIPPA, B. Persistent Scatterer Interferometry: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 78–89, 2016. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>>. .

CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; IGLESIAS, R.; CRIPPA, B. Persistent Scatterer Interferometry: Potential, limits and initial C- and X-band comparison. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 76, n. 9, p. 1061–1069, 2010.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. In: A. K. Turner; R. L. Schuster (Orgs.); **Landslides Investigation and Mitigation (Special Report 247)**. p.36–75, 1996. National Research Council.

CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CRIPPA, B. Sentinel-1A/B imagery for terrain deformation monitoring: A strategy for Atmospheric Phase Screening (APS) estimation. **Procedia Computer Science**, v. 138, p. 388–392, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.055>>. .

CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic aperture Radar Systems and Signal Processing**. New York, 1991.

CZIKHARDT, R.; PAPCO, J.; BAKON, M.; et al. Ground stability monitoring of undermined and landslide prone areas by means of sentinel-1 multi-temporal InSAR, case study from Slovakia. **Geosciences (Switzerland)**, v. 7, n. 3, p. 1–17, 2017.

DAMMANN, D. O.; EICKEN, H.; MEYER, F. J.; MAHONEY, A. R. Assessing small-scale deformation and stability of landfast sea ice on seasonal timescales through L-band SAR interferometry and inverse modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 492–504, 2016. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.032>>. .

DAS, S.; CHAKRABORTY, M. Mass balance of Chhota Shigri glacier using dual-polarized C band SAR data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 13, p. 150–157, 2019. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.11.003>>. .

DECLERCQ, P.-Y.; DUSAR, M.; PIRARD, E.; et al. Post Mining Ground Deformations Transition Related to Coal Mines Closure in the Campine Coal Basin, Belgium, Evidenced by Three Decades of MT-InSAR Data. **Remote Sensing**, v. 15, n. 3, p. 725, 2023.

DING, L.; LI, C.; WEI, L.; et al. Slope Deformation Prediction Based on MT-InSAR and Fbprophet for Deep Excavation Section of South–North Water Transfer Project. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 17, 2022.

DOMENECH, M. B.; AMIOTTI, N. M.; COSTA, J. L.; CASTRO-FRANCO, M. Prediction of topsoil properties at field-scale by using C-band SAR data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 93, n. June, p. 102197, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102197>>. .

DOMINGUES, G. F.; SOARES, V. P.; LEITE, H. G.; et al. Artificial neural networks on integrated multispectral and SAR data for high-performance prediction of eucalyptus biomass. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 168, n. November, p. 105089, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105089>>. .

DOZIER, J.; SHI, J. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR. II. Inferring snow depth and particle size. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 6, p. 2475–2488, 2000. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/885196/>>. .

DU, Z. **Mapping Earth Surface Deformation using New Time Series Satellite Radar Interferometry**, 2017. University of New South Wales.

DUMKA, R. K.; SURIBABU, D.; NARAIN, P.; et al. PSInSAR and GNSS derived

deformation study in the west part of Narmada Son Lineament (NSL), western India. **Quaternary Science Advances**, v. 4, n. June, p. 100035, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.qsa.2021.100035>>. .

DUPUIS, X.; MARTINEAU, P. Very high resolution circular SAR imaging at X band. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, p. 930–933, 2014.

ESA. Sentinel Application Platform - SNAP. Disponível em: <<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>>. Acesso em: 19/7/2019a.

ESA. Sentinel-1 SAR User Guide. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>>. Acesso em: 4/10/2021b.

EUILLADES, P. A.; EUILLADES, L. E.; ROSELL, P.; ROA, Y. Subsidence in Maceio, Brazil, Characterized by Dinsar and Inverse Modeling. **2020 IEEE Latin American GRSS and ISPRS Remote Sensing Conference, LAGIRS 2020 - Proceedings**, p. 313–317, 2020.

EVERS, M.; KYRIOU, A.; SCHULZ, K.; NIKOLAKOPOULOS, K. G. A study on recent ground deformation near Patras, Greece. In: K. Schulz; K. G. Nikolakopoulos; U. Michel (Orgs.); Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications X. **Anais...** . p.20, 2019. SPIE. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11156/2531829/A-study-on-recent-ground-deformation-near-Patras-Greece/10.1117/12.2531829.full>>. .

FARINA, P.; COLOMBO, D.; FUMAGALLI, A.; MARKS, F.; MORETTI, S. Permanent Scatterers for Landslide Investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. **Engineering Geology**, v. 88, n. 3–4, p. 200–217, 2006.

FAROLFI, G.; DEL SOLDATO, M.; BIANCHINI, S.; CASAGLI, N. A procedure to use GNSS data to calibrate satellite PSI data for the study of subsidence: an example from the north-western Adriatic coast (Italy). **European Journal of Remote Sensing**, v. 52, n. sup4, p. 54–63, 2019. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1663710>>. .

FELIPE, S. Características Geológico Geotécnicas na Formação Guabirotuba Curitiba. **MINEROPAR - Serviço Geológico do Paraná**, v. 1ª Edição, n. CDU: 624.13, p. 48, 2011.

FERRETTI, A.; FUMAGALLI, A.; NOVALI, F.; et al. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3460–3470, 2011.

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

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

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 1, p. 8–20, 2001.

FERRO-FAMIL, L.; POTTIER, E. Synthetic Aperture Radar Imaging. **Microwave Remote Sensing of Land Surfaces: Techniques and Methods**, p. 1–65, 2016.

FILHO, E. R.; HINDI, E. C.; GIUSTI, D. A. Contribuição das Águas Subterrâneas no Abastecimento de Curitiba-Paraná. , , n. April, 2000.

FILY, M.; DEDIEU, J. P.; SURDYK, S. A SAR image study of a snow-covered area in the French Alps. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 2, p. 253–262, 1995.

FLORES-ANDERSON, A. I.; HERNDON, K. E.; THAPA, R. B.; CHERRINGTON, E. **The SAR Handbook**. NASA, 2019.

FRANCESCHETTI, G.; LANARI, R. **Synthetic aperture radar processing**. Taylor & Francis, 1999.

FRANGIONI, S. **Applications of SAR Interferometry for Monitoring Ground Deformations and Engineering Infrastructure**, 2014. Universtia Degli Studi Firenze.

GABRIEL, A. K.; GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. B7, p. 9183–9191, 1989.

GAMA, F. F.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; DE OLIVEIRA, C. G. Advanced DINSAR analysis on dam stability monitoring: A case study in the Germano mining complex (Mariana, Brazil) with SBAS and PSI techniques. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 16, 2019.

GARRIDO, R.; BOTELHO, M. Características E Propriedades Dos Solos Relevantes Para Os Estudos Pedológicos E. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 19, n. M, p. 93–114, 1996.

GEOMATICA. Geomatica Training Guide: SAR Processing with Geomatica. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Mohamed\\_Mourad\\_Lafifi/post/How\\_to\\_generate\\_a\\_Coherency\\_matrix\\_in\\_SAR\\_Polarimetry/attachment/59d648ac79197b80779a353e/AS%3A467837115473921%401488552469027/download/TrainingGuide-SAR-processing-with-Geomatica.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Mourad_Lafifi/post/How_to_generate_a_Coherency_matrix_in_SAR_Polarimetry/attachment/59d648ac79197b80779a353e/AS%3A467837115473921%401488552469027/download/TrainingGuide-SAR-processing-with-Geomatica.pdf)>. Acesso em: 25/11/2022.

GEOTURISMOBRASIL. Geologia de Curitiba. , 2020. Curitiba. Disponível em: <[http://www.geoturismobrasil.com/Material didatico/Geologia de Curitiba.pdf](http://www.geoturismobrasil.com/Material%20didatico/Geologia%20de%20Curitiba.pdf)>. .

GIUSTI, D. A. **Contribuição a Geologia Ambiental no Município de Curitiba - PR**, 1989. Universidade de São Paulo.

GRAHAM, L. C. Synthetic Interferometer Radar For Topographic Mapping. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 6, p. 763–768, 1974.

GUERRA, J. B.; CECARELLI, I. C. F.; LOMONACO, B. F. Análise da viabilidade do uso das técnicas DInSAR e PSInSAR com dados TerraSAR X para monitorar movimentos da superfície na região da UHE Salto Pilão-SC. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, 2011.

GUERRA, J. B.; MURA, J. C.; DA COSTA FREITAS, C. Discriminating deforestation increment areas in the Amazon rainforest with L band SAR R99B data. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 3, p. 557–566, 2010.

GUO, J.; HU, J.; LI, B.; ZHOU, L.; WANG, W. Land subsidence in Tianjin for 2015 to 2016 revealed by the analysis of Sentinel-1A with SBAS-InSAR. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 026024, 2017.

GUO, L.; GONG, H.; LI, J.; et al. Understanding Uneven Land Subsidence in Beijing, China, Using a Novel Combination of Geophysical Prospecting and InSAR. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 16, p. 1–11, 2020.

HANSEN, R. F. **Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis**. 1<sup>o</sup> ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001.

HANSEN, R. F. Satellite radar interferometry for deformation monitoring: A priori assessment of feasibility and accuracy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 6, n. 3–4, p. 253–260, 2005.

HARTWIG, M. E. **Monitoramento De Taludes De Mineração Por Interferometria Diferencial com Dados Terrasar-X Na Amazônia: Mina De N4W, Serra De Carajás, Pará, Brasil**, 2014. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G5LJSS>>. .

HASTAOGLU, K. O. Comparing the results of PSInSAR and GNSS on slow motion landslides, Koyulhisar, Turkey. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 7, n. 2, p. 786–803, 2016. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19475705.2014.978822>>. .

HEILBRON, M.; VALERIANO, C. M.; TASSINARI, C. C. G.; et al. Correlation of neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: Comparative tectonic evolution and open questions. **Geological Society Special Publication**, v. 294, n. d, p. 211–237, 2008.

HERNDON, K.; MEYER, F.; FLORES, A.; CHERRINGTON, E.; KUCERA, L. What is Synthetic Aperture Radar? Disponível em: <<https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>>. .

HERRING, T. A.; KING, R. W.; FLOYD, M. A.; MCCLUSKY, S. C. GAMIT Reference Manual Release 10.7. Massachusetts Institute of Technological, Cambridge, Massachusetts. , n. June, p. 1–168, 2018.

HEXAGON. Imagine SAR Interferometry. Disponível em: <<https://hexagon.com/products/imagine-sar-interferometry>>. Acesso em: 21/10/2019.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The landslide Handbook - A guide to understanding landslides. **US Geological Survey Circular**, n. 1325, p. 1–147, 2008.

HILLEY, G. E.; BÜRGMANN, R.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; ROCCA, F. Dynamics of Slow-moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. **Science**, v. 304, n. 5679, p. 1952–1955, 2004.

HOOPER, A. J. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 16, p. 1–5, 2008.

HOOPER, A.; SEGALL, P.; ZEBKER, H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 112, n. 7, p. 1–21, 2007.

HOOPER, A.; SPAANS, K.; BEKAERT, D.; et al. StaMPS/MTI Manual. , p. 1–35, 2010.

HOOPER, A.; SPAANS, K.; BEKAERT, D.; CUENCA, M. C.; ARIKAN, M. StaMPS / MTI Manual. , p. 44, 2018.

HOOPER, A.; ZEBKER, H. A. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. **Journal of the Optical Society of America A**, v. 24, n. 9, p. 2737, 2007.

HOOPER, A.; ZEBKER, H.; SEGALL, P.; KAMPES, B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 23, p. 1–5, 2004.

HU, B.; CHEN, J.; ZHANG, X. Monitoring the land subsidence area in a coastal urban area with InSAR and GNSS. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 14, p. 1–19, 2019.

HU, X.; LU, Z.; PIERSON, T. C.; KRAMER, R.; GEORGE, D. L. Combining InSAR and GPS to Determine Transient Movement and Thickness of a Seasonally Active Low-Gradient Translational Landslide. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 3, p. 1453–1462, 2018.

HUANG, L.; LI, Z.; TIAN, B. SEN; CHEN, Q.; ZHOU, J. MIN. Monitoring glacier zones and snow/firn line changes in the Qinghai-Tibetan Plateau using C-band SAR imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 137, p. 17–30, 2013. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.016>>. .

IAT. Mapeamento Geológico - MINEROPAR. Disponível em: <<http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapeamento-Geologico>>. Acesso em: 21/10/2021.

IBGE. Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos - GPS. **IBGE**, v. 39, n. 5, p. 561–563, 2008.

IBGE. Duas novas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo entram em operação no Amazonas. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/15237-duas-novas-estacoes-da-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-entram-em-operacao-no-amazonas>>. Acesso em: 13/10/2021.

IBGE. Manual do Usuário: Posicionamento por Ponto Preciso. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/%0Amanual\\_ppp.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/%0Amanual_ppp.pdf)>. .

IBGE. Cidades e Estados - Maceió. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/maceio.html>>. Acesso em: 21/12/2022a.

IBGE. IBGE Cidades - Curitiba. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/curitiba/panorama>>. Acesso em: 19/10/2021b.

IBGE. Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em Tempo Real. , p. 47, 2021c. Disponível em: <[https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rbmc/cartogramas/RBMC\\_2021.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/cartogramas/RBMC_2021.pdf)> .

JIANG, L.; ZHAO, Q.; CHENG, S.; LIN, H. Integrated analysis of PSInSAR and geological data for investigating local differential settlement of new Hong Kong International Airport. **International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA)**, v. 7285, n. December 2008, p. 72854D, 2008.

KAMPES, B. Delft object-oriented radar interferometric software: Users manual and technical documentation. **Delft University of Technology, Delft**, 1999. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Delft+Object-oriented+Radar+Interferometric+Software+User+?+s+manual+and+technical+documentation#1>> .

KAMPES, B.; USAI, S. Doris: the Delft Object-oriented Radar Interferometric Software. **2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing**, 1999.

KANEVSKY, M. B. **Radar Imaging of the Ocean Waves**. 1º ed. Oxford, 2009.

KARIMZADEH, S.; MATSUOKA, M. Remote sensing x-band sar data for land subsidence and pavement monitoring. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 17, p. 1–21, 2020.

KEZIAH, J.; MUTHUKUMARAN, N. Design of K Band Transmitting Antenna for Harbour Surveillance Radar Application. , , n. June, p. 1–6, 2016.

KOMAC, M.; HOLLEY, R.; MAHAPATRA, P.; VAN DER MAREL, H.; BAVEC, M. Coupling of GPS/GNSS and radar interferometric data for a 3D surface displacement monitoring of landslides. **Landslides**, v. 12, n. 2, p. 241–257, 2015.

KOTHYARI, G. C.; JOSHI, N.; TALOOR, A. K.; et al. Reconstruction of active surface deformation in the Rishi Ganga basin, Central Himalaya using PSInSAR: A feedback towards understanding the 7th February 2021 Flash Flood. **Advances in Space Research**, , n. February, 2021. COSPAR. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.002>> .

KRUEGER, C. P.; DE OLIVEIRA JUNIOR, P. S.; DOS ANJOS GARNÉS, S. J.; ALVES, D. B. M.; EURIQUES, J. F. Real-time GNSS positioning: Evolution, practical applications and perspectives for the future. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1359–1379, 2020.

KUMAR MAURYA, V.; DWIVEDI, R.; RANJAN MARTHA, T. Site scale landslide deformation and strain analysis using MT-InSAR and GNSS approach – A case study. **Advances in Space Research**, v. 70, n. 12, p. 3932–3947, 2022. COSPAR. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.028>> .

L3HARRIES. ENVI ® SARSCAPE ® Process, analyze and solve problems with SAR data. Disponível em: <[https://www.l3harrisgeospatial.com/Portals/0/pdfs/L3HG\\_21\\_SARscape\\_sell\\_sheet\\_Web.pdf](https://www.l3harrisgeospatial.com/Portals/0/pdfs/L3HG_21_SARscape_sell_sheet_Web.pdf)>. Acesso em: 22/1/2023.

LANARI, R.; FORNARO, G.; RICCIO, D.; et al. Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: The etna case study. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 5, p. 1097–1114, 1996.

LASSWELL, S. W. History of SAR at Lockheed Martin (previously Goodyear Aerospace). In: R. N. Trebits; J. L. Kurtz (Orgs.); Radar Sensor Technology IX. **Anais...** . v. 5788, p.1–12, 2005. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=863726>> .

LEIJEN, F. VAN. **Persistent Scatterer Interferometry based on geodetic estimation theory**. 2014.

LI, C.; FERNANDEZ-STEEGER, T. M.; LINK, J. Á. B.; MAY, M.; AZZAM, R. Use of mems accelerometers/inclinometers as a geotechnical monitoring method for ground subsidence. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 11, n. 4, p. 337–349, 2014.

LI, Z.; BETHEL, J. Image coregistration in SAR interferometry. **International Archives**

of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 37, p. 433–438, 2008.

DE LIMA, F. M.; FERNANDES, L. A.; DE MELO, M. S.; GÓES, A. M.; MACHADO, D. A. M. Faciologia e contexto deposicional da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba (PR). **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 1, p. 168–184, 2013.

LIU, G.; LI, J.; XU, Z.; et al. Surface deformation associated with the 2008 Ms8.0 Wenchuan earthquake from ALOS L-band SAR interferometry. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, n. 6, p. 496–505, 2010.

LIU, G.; LUO, X.; CHEN, Q.; HUANG, D.; DING, X. Detecting land subsidence in Shanghai by PS-networking SAR interferometry. **Sensors**, v. 8, n. 8, p. 4725–4741, 2008.

LIU, H.; HUANG, S.; XIE, C.; et al. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai–Tibet Railway by MT-InSAR Technology. **Land**, v. 12, n. 2, p. 474, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-445X/12/2/474>>. .

LONG, N. Q.; VAN ANH, T.; KHAC LUYEN, B. Determination of Ground Subsidence by Sentinel-1 SAR Data (2018–2020) over Binh Duong Quarries, Vietnam. **VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences**, v. 37, n. 2, p. 69–83, 2021.

LU, L.; FAN, H.; LIU, JIE; LIU, JIULI; YIN, J. Time series mining subsidence monitoring with temporarily coherent points interferometry synthetic aperture radar: a case study in Peixian, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 15, p. 1–17, 2019.

DE LUNA, R. M. R.; DOS ANJOS GARNÉS, S. J.; DA SILVA PEREIRA CABRAL, J. J.; DOS SANTOS, S. M. Suitability of GNSS for analysis of soil subsidence in Recife in a highly urbanized coastal area. **Natural Hazards**, v. 106, n. 3, p. 1821–1837, 2021. Springer Netherlands. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11069-021-04513-2>>. .

LUO, Q.; LI, J.; ZHANG, Y. Monitoring Subsidence over the Planned Jakarta–Bandung (Indonesia) High-Speed Railway Using Sentinel-1 Multi-Temporal InSAR Data. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, 2022.

MACEIO. LEI-4952-2000-MACEIO-AL. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/AL/MACEIO/LEI-4952-2000-MACEIO-AL.pdf>>. Acesso em: 23/1/2023.

MAHMUD, M. U.; YAKUBU, T. A.; OLUWAFEMI, O.; et al. Application of Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar (MT-InSAR) technique to Land Deformation Monitoring in Warri Metropolis, Delta State, Nigeria. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 1220–1227, 2016.

MANTOVANI, M.; BOSSI, G.; DYKES, A. P.; et al. Coupling long-term GNSS monitoring and numerical modelling of lateral spreading for hazard assessment purposes. **Engineering Geology**, v. 296, n. September 2021, p. 106466, 2022. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106466>>. .

MARTIRE, D. DI. **Application of DInSAR data for slow-moving landslides monitoring**, 2013. Università Degli Studi Di Napoli Federico II. Disponível em: <<http://www.fedoa.unina.it/9374/>>. .

MASSONNET, D.; ADRAGNA, F. Description of DIAPASON software developed by CNES current and future applications. , 1997. Switzerland: ERS SAR interferometry.

MASSONNET, D.; FEIGL, K.; ROSSI, M.; ADRAGNA, F. Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. **Nature**, v. 369, n. 6477, p. 227–230, 1994.

MASSONNET, D.; ROSSI, M.; CARMONA, C.; et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. **Nature**, v. 364, n. 6433, p. 138–142, 1993.

MEDHAT, N. I.; YAMAMOTO, M. Y.; ICHIHASHI, Y. Inclinator and Improved SBAS Methods with a Random Forest for Monitoring Landslides and Anchor Degradation in Otoyoto Town, Japan. **Remote Sensing**, v. 15, n. 2, p. 1–18, 2023.

MELEZHIK, P. N.; ANDRENKO, S. D.; SIDORENKO, Y. B.; et al. Coherent Ka-band radar with a semiconductor transmitter for airport surface movement monitoring. **2008 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Proceedings of Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles, TIWDC/ESAV 2008**, , n. cm, p. 2–6, 2008.

MELEZHIK, P.; RAZSKAZOVSKIY, V.; REZNICHENKO, N.; et al. High-efficiency millimeter-wave coherent radar for airport surface movement monitoring and control. **Aviation**, v. 15, n. 2, p. 38–43, 2011.

MENDES, E. A. A.; SOUZA, A. M.; FERNANDES, A. M. P.; et al. Mananciais subterrâneos no estado do paraná. **XII Congresso Brasileiro de  guas Subterrâneas**, p. 1–20, 2002.

MERMOZ, S.; R JOU-M CHAIN, M.; VILLARD, L.; et al. Decrease of L-band SAR backscatter with biomass of dense forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 159, p. 307–317, 2015. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.019>>. .

MINEROPAR. **Atlas Comentado da Geologia e do Recursos Minerais do Estado do Paraná**. Curitiba, 2001.

MINTPY. MintPy. Disponível em: <<https://github.com/insarlab/MintPy>>. Acesso em: 19/7/2021.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**. 2.ed. ed. São Paulo: UNESP, 2008.

MORA, O.; ORDOQUI, P.; ROMERO, L. Generation of classical dinsar and PSI ground motion maps on a cloud thematic platform. **European Space Agency, (Special Publication) ESA SP**, v. SP-740, n. 1, p. 3–6, 2016.

MORAIS, M. C. DE; MARTINS JUNIOR, P. P.; PARADELLA, W. R. Mapping iron-mineralized laterite environments based on textural attributes from MAPSAR image simulation - SAR-R99B (SIVAM/SIPAM) in the Amazon region. **Revista Brasileira de Geof sica**, v. 29, n. 1, p. 99–111, 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2011000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2011000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=en)>. .

MOREIRA, A.; PRATS-IRAOLA, P.; YOUNIS, M.; et al. A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 1, n. 1, p. 6–43, 2013.

MORISHITA, Y.; LAZECKY, M.; WRIGHT, T. J.; et al. LiCSBAS: An open-source insar time series analysis package integrated with the LiCSAR automated sentinel-1 InSAR processor. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 5–8, 2020.

MURA, J. C. **Geocodifica o Autom tica De Imagens De Radar De Abertura Sintética Interferométrico : Sistema Geo-InSAR**, 2001. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; et al. Monitoring of non-linear ground movement in an open pit iron mine based on an integration of advanced DInSAR techniques using TerraSAR-X data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.

NA OES UNIDAS. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. 2018  ed. New York, 2019.

NATALE, A.; GUIDA, R.; BIRD, R.; et al. Demonstration and analysis of the applications of S-band SAR. **2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, APSAR 2011**, p. 167–170, 2011.

NEGRÃO, P. **Detec o de Deslocamentos Superficiais no Complexo Minerador de Germano, Marina-MG, Com Técnica Integrada de A-DINSAR Utilizando Dados TerraSAR-X**, 2018. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

NICOLAU, A. P.; FLORES-ANDERSON, A.; GRIFFIN, R.; HERNDON, K.; MEYER, F. J. Assessing SAR C-band data to effectively distinguish modified land uses in a heavily disturbed Amazon forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 94, n. August 2020, p. 102214, 2021. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102214>>. .

NINGTHOUJAM, R. K.; BALZTER, H.; TANSEY, K.; et al. Airborne S-band SAR for forest biophysical retrieval in temperate mixed forests of the UK. **Remote Sensing**, v. 8, n. 7, p. 1–22, 2016.

NINGTHOUJAM, R. K.; TANSEY, K.; BALZTER, H.; et al. Mapping forest cover and forest cover change with airborne S-band radar. **Remote Sensing**, v. 8, n. 7, 2016.

OLIVEIRA, L. M. DE. **Acidentes geológicos urbanos**. 2010.

OLIVEIRA, S. C.; ZÊZERE, J. L.; CATALÃO, J.; NICO, G. The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. **Landslides**, v. 12, n. 4, p. 703–719, 2015.

OLIVER, C. J. Synthetic-aperture radar imaging. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 22, n. 7, 1989.

OPENSTREETMAP. OpenStreetMap. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/>>. Acesso em: 25/10/2021.

PARADELLA, W. R.; FERRETTI, A.; MURA, J. C.; et al. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. **Engineering Geology**, v. 193, p. 61–78, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.015>>.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F. **Monitoramento DInSAR para Mineração e Geotecnologia**. 1º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 4, p. 797–811, 2012.

PAVANELLI, J. A. P.; DOS SANTOS, J. R.; GALVÃO, L. S.; XAUD, M. R.; XAUD, H. A. M. Palsar-2/ALOS-2 and Oli/Landsat-8 data integration for land use and land cover mapping in northern Brazilian Amazon. **Boletim de Ciências Geodesicas**, v. 24, n. 2, p. 250–269, 2018.

PEI, Y.; WANG, H.; FANG, ZHILEI; LIAO, M.; FANG, ZHEN. Monitoring subsidence with short-term ASAR data in Shanghai. **MIPPR 2009: Multispectral Image Acquisition and Processing**, v. 7494, n. October 2009, p. 749421, 2009.

PELTIER, A.; BIANCHI, M.; KAMINSKI, E.; et al. PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de La Fournaise. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 12, p. 1–5, 2010.

PEREIRA, P.; BAPTISTA, P.; CUNHA, T.; et al. Estimation of the nearshore bathymetry from high temporal resolution Sentinel-1A C-band SAR data - A case study. **Remote Sensing of Environment**, v. 223, n. April 2018, p. 166–178, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.003>>.

PERISSIN, D. Sarproz. **Sarproz.Com**, p. 7, 2015. Disponível em: <<https://sarproz.com/publish/SARPROZ.pdf>>.

PERISSIN, D.; FERRETTI, A.; PRATI, C.; FABIO, R. On the physical characterization of SAR Permanent Scatterers in urban areas. **Proceedings of EUSAR'06**, , n. 2, p. 20–21, 2006. Disponível em: <<http://home.dei.polimi.it/perissin/Publish/05UrsiPhysNatPS.pdf>>.

PERISSIN, D.; WANG, T. Time-Series InSAR Applications Over Urban Areas in China. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 92–100, 2011.

PERISSIN, D.; WANG, T. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 1, p. 271–280, 2012.

PERISSIN, D.; WANG, Z.; WANG, T. The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. **34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring**, 2011.

PEZZO, G.; PALANO, M.; BECCARO, L.; et al. Coupling Flank Collapse and Magma Dynamics on Stratovolcanoes: The Mt. Etna Example from InSAR and GNSS Observations. **Remote Sensing**, v. 15, n. 3, 2023.

PHALIPPOU, L.; CAUBET, E.; THOUVENOT, E. Ka-band altimeter for future altimetry missions. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 1, p. 503–505, 1999.

PINTO, C. DE A.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; et al. Applying persistent scatterer interferometry for surface displacement mapping in the Azul open pit manganese mine (Amazon region) with TerraSAR-X StripMap data. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 095978, 2015.

QU, F.; LU, Z.; ZHANG, Q.; et al. Mapping ground deformation over Houston-Galveston, Texas using multi-temporal InSAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 169, p. 290–306, 2015. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.027>>. .

RADUTU, A.; NEDELICU, I.; GOGU, C. R. An overview of ground surface displacements generated by groundwater dynamics, revealed by InSAR techniques. **Procedia Engineering**, v. 209, p. 119–126, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.137>>. .

RAMOS, F. L. G. **Desenvolvimento de Técnicas para Processamento de Dados Orbitais de Interferometria SAR em Regiões Equatoriais Úmidas: Estudo de Caso em Manaus, Amazonas, Brasil**, 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RIGHINI, G.; DEL CONTE, S.; CIGNA, F.; CASAGLI, N. Slope instability mapping around L'Aquila (Abruzzo, Italy) with Persistent Scatterers Interferometry from ERS, ENVISAT and RADARSAT datasets. **EGU General Assembly Conference Abstracts**, v. 12, n. 2003, p. 3980, 2010.

RIGHINI, G.; PANCIOLI, V.; CASAGLI, N. Updating landslide inventory maps using Persistent Scatterer Interferometry (PSI). **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 7, p. 2068–2096, 2012.

RODRIGUES, T. G.; PARADELLA, W. R.; OLIVEIRA, C. G. Evaluation of the altimetry from SRTM-3 and planimetry from high-resolution PALSAR FBD data for semi-detailed topographic mapping in the Amazon Region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 83, n. 3, p. 953–966, 2011.

ROQUE, D.; SIMONETTO, E.; FALCÃO, A. P.; et al. An analysis of displacement measurements for Lisbon, Portugal, using combined InSAR and GNSS data. **European Space Agency, (Special Publication) ESA SP**, v. SP-740, n. 1, 2016.

ROSA FILHO, E. F. DA; HINDI, E. C.; LUCENA, L. R. F. DE. Os Aquíferos Que Contribuem No Abastecimento Da Cidade De Curitiba-Paraná. **Águas Subterrâneas**, v. 16, n. 1, p. 1–6, 2002.

ROSEN, P. A.; GURROLA, E.; SACCO, G. F.; ZEBKER, H. The InSAR scientific computing environment. **Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR**, v. 2012-April, p. 730–733, 2012.

ROSEN, P. A.; HENSLEY, S.; JOUGHIN, I. R.; et al. Synthetic aperture radar interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, n. 3, p. 333–382, 1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/838084/>>. .

ROSEN, P. A.; HENSLEY, S.; JOUGHIN, I. R.; et al. Synthetic aperture radar interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, n. 3, p. 333–382, 2000. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <[http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-11741-1\\_11](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-11741-1_11)>. .

ROSEN, P. A.; HENSLEY, S.; PELTZER, G.; SIMONS, M. Updated repeat orbit interferometry package released. **Eos**, v. 85, n. 5, p. 47, 2004.

ROSEN, P.; PERSAUD, P. ROI\_PAC Documentation Repeat Orbit Interferometry Package. , , n. 3, p. 1–63, 2000.

RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; BAKON, M.; LAZECKY, M.; et al. Multi-Temporal InSAR Processing Comparison in Presence of High Topography. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 1181–1190, 2016.

RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; LAZECKY, M.; HLAVÁČOVÁ, I.; et al. Deformation monitoring of dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain). **Procedia Computer Science**, v. 138, p. 346–353, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.049>>. .

RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; LAZECKY, M.; RUIZ-CONSTÁN, A.; et al. Monitoring continuous subsidence in the Costa del Sol (Málaga province, southern Spanish coast) using ERS-1/2, Envisat, and Sentinel-1A/B SAR interferometry. **Procedia Computer Science**, v. 138, p. 354–361, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.050>>. .

SALAMUNI, E. **Tectônica Da Bacia Sedimentar De Curitiba (PP)**Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Unesp, 1998. Universidade Estadual Paulista.

SANDWELL, D.; MELLORS, R.; TONG, X.; WEI, M.; WESSEL, P. Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 92, n. 28, p. 2011–2011, 2011.

SANEPAR. Gestão Sustentável dos Aquíferos. Disponível em: <<https://site.sanepar.com.br/sustentabilidade/gestao-sustentavel-dos-aquiferos>>. Acesso em: 19/10/2021.

SANO, E. E.; HUETE, A. R.; MORAN, M. S. Estimation of surface roughness in a semiarid region from C-band ERS-1 synthetic aperture radar data. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 903–908, 1999.

SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAUJO, L. S.; et al. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 482–493, 2003.

SARMAP. PS Tutorial. , , n. November, p. 1–39, 2014.

SCHWATKE, C.; DETTMERING, D.; BÖRGENS, E.; BOSCH, W. Potential of SARAL/AltiKa for Inland Water Applications. **Marine Geodesy**, v. 38, n. September, p. 626–643, 2015.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2nd ed. Berlin . New York: Walter de Gruyter, 2003.

SHI, J.; DOZIER, J. Mapping Seasonal Snow with. **Techniques**, v. 307, n. January 1996, p. 294–307, 1997.

SILVA, G. G.; MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; TEMPORIM, F. A. Monitoring of ground movement in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon region) based on A-DInSAR techniques using TerraSAR-X data. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 026027, 2017.

SILVA, J. A. B.; BARROSO, R. DE C. A.; RODRIGUES, A. J.; COSTA, S. S.; FONTANA, R. L. M. Á Urbanização No Mundo Contemporâneo E Os Problemas Ambientais. **Caderno de Graduação - Ciências Humanas e Sociais - UNIT**, v. 2, n. 2, p. 197–207, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernohumanas/article/view/1723>>.

DA SILVA NARVAES, I.; DOS SANTOS, J. R.; DA SILVA, A. DE Q. Analysis of structural parameters of forest typologies using I-band sar data. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, n. 3, p. 475–489, 2010.

SIMONS; ROSEN, P. Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy. In: G. Schubert (Org.); **Treatise on Geophysics**. 11<sup>o</sup> ed, v. 3, p.339–382, 2015. Pasadena: Elsevier.

SINGH VIRK, A.; SINGH, A.; MITTAL, S. K. Advanced MT-InSAR Landslide Monitoring: Methods and Trends. **Journal of Remote Sensing & GIS**, v. 07, n. 01, p. 1–6, 2018. Disponível em: <<https://www.omicsonline.org/open-access/advanced-mtinsar-landslide-monitoring-methods-and-trends-2469-4134-1000225-100195.html>>. .

SNEED, M.; BRANDT, J. T. Detection and Measurement of Land Subsidence Using

Global Positioning System Surveying and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1996–2005. **USGS**, n. June, p. 1996–2005, 2013.

SOJA, M. J.; QUEGAN, S.; D'ALESSANDRO, M. M.; et al. Mapping above-ground biomass in tropical forests with ground-cancelled P-band SAR and limited reference data. **Remote Sensing of Environment**, v. 253, p. 112153, 2021. Elsevier Inc. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112153>>. .

SOUSA, J. J.; HOOPER, A. J.; HANSSSEN, R. F.; BASTOS, L. C.; RUIZ, A. M. Persistent Scatterer InSAR: A comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 10, p. 2652–2663, 2011. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.021>>. .

SOUSA, J. J.; RUIZ, A. M.; BAKOŇ, M.; et al. Potential of C-Band SAR Interferometry for Dam Monitoring. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 1103–1114, 2016.

SOUSA, J. J.; RUIZ, A. M.; HOOPER, A. J.; et al. Multi-temporal InSAR for Deformation Monitoring of the Granada and Padul Faults and the Surrounding Area (Betic Cordillera, Southern Spain). **Procedia Technology**, v. 16, p. 886–896, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.040>>. .

SUDERHSA. Unidade Aquíferas do Paraná. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapas-e-Dados-Espaciais>>. Acesso em: 20/10/2021.

TANASE, M. A.; PANCIERA, R.; LOWELL, K.; et al. Airborne multi-temporal L-band polarimetric SAR data for biomass estimation in semi-arid forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 93–104, 2014. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.024>>. .

TAPETE, D.; FANTI, R.; CECCHI, R.; PETRANGELI, P.; CASAGLI, N. Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites. **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 9, n. 4, 2012.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. DE; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo, 2003.

TEMPORIM, F. A.; GAMA, F. F.; MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; SILVA, G. G. Application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in N5E open pit iron mine using TerraSAR-X data, in Carajás Province, Amazon region. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, n. 2, p. 225–235, 2017.

TREVETT, J. W. **Imaging Radar for Resources Surveys**. New York: Chapman&Hall, 1986.

TSANGARATOS, P.; LOUPASAKIS, C.; ILIA, I. Ground subsidence phenomena in Frakadona, West Thessaly, Greece. , n. September 2017, p. 40, 2017.

USTUN, A.; TUSAT, E.; YALVAC, S. Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006-2009 by means of GNSS observations. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 10, n. 6, p. 1151–1157, 2010.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. In: R. L. Schuster; R. J. Krizek (Orgs.); **Landslides: Analysis and Control**. 176° ed, p.11–13, 1978. Washington D.C.: Transportation Research Board Special Report 176.

VASSILEVA, M.; AL-HALBOUNI, D.; MOTAGH, M.; et al. A decade-long silent ground subsidence hazard culminating in a metropolitan disaster in Maceió, Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–13, 2021. Nature Publishing Group UK. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-87033-0>>. .

VAZQUEZ-ONTIVEROS, J. R.; MARTINEZ-FELIX, C. A.; VAZQUEZ-BECERRA, G. E.; et al. Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on GPS observations. **Advances in Space Research**, v. 69, n. 1, p. 319–330, 2022. COSPAR. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.018>>. .

VESTENA, L. R.; KOBIYAMA, M.; SANTOS, L. J. C. Considerações sobre gestão

ambiental em áreas cársticas. **RA'E GA - O Espaço Geografico em Analise**, v. 6, n. 6, p. 81–93, 2002.

VOLLRATH, A.; ZUCCA, F.; STRAMONDO, S. Monitoring of infrastructural sites by means of advanced multi-temporal DInSAR methods. **SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XIII**, v. 8891, n. October 2013, p. 88910D, 2013.

WANG, G.; ZHOU, X.; WANG, K.; et al. GOM20: A stable geodetic reference frame for subsidence, faulting, and sea-level rise studies along the coast of the Gulf of Mexico. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, 2020.

WEGNÜLLER, U.; WERNER, C.; STROZZI, T.; et al. Sentinel-1 Support in the GAMMA Software. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 1305–1312, 2016. The Author(s). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.246>> . .

WEMPEN, J. M.; MCCARTER, M. K. Comparison of L-band and X-band differential interferometric synthetic aperture radar for mine subsidence monitoring in central Utah. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 27, n. 1, p. 159–163, 2017. China University of Mining & Technology. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.11.012>> . .

WERLICH, R. M. C. **Análise de Alternativas de Processamento GPS para Detecção de Deslocamentos Verticais de Terra em Áreas Urbanizadas**, 2017. Universidade Federal do Paraná.

WERNER, C.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. GAMMA SAR and interferometric processing software. **European Space Agency, (Special Publication) ESA SP**, , n. 461, p. 211–219, 2000.

WERNER, C.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 7, n. 1, p. 4362–4364, 2003.

WILEY, C. Pulsed Doppler Radar Method and Means. **US Patent**, 1954.

YALVAC, S. Validating InSAR-SBAS results by means of different GNSS analysis techniques in medium- and high-grade deformation areas. **Environmental Monitoring and Assessment**, 2020.

YANG, Z. **Monitoring and Predicting Railway Subsidence Using InSAR and Time Series Prediction Techniques**, 2015. University of Birmingham.

YHOKHA, A.; GOSWAMI, P. K.; CHANG, C. P.; et al. Application of persistent scatterer interferometry (PSI) in monitoring slope movements in Nainital, Uttarakhand lesser Himalaya, India. **Journal of Earth System Science**, v. 127, n. 1, p. 1–13, 2018. Springer India. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12040-017-0907-y>> . .

YUNJUN, Z.; FATTAHI, H.; AMELUNG, F. Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. **Computers and Geosciences**, v. 133, n. i, 2019.

YUWONO, B.; AWALUDDIN, M.; . N. Land Subsidence monitoring 2016 - 2018 analysis using GNSS CORS UDIP and DinSAR in Semarang. **KnE Engineering**, v. 2019, p. 95–105, 2019.

DE ZAN, F.; GUARNIERI, A. M. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 9, p. 2352–2360, 2006.

ZHAO, R.; WANG, G.; YU, X.; et al. Rapid Land Subsidence in Tianjin, China Derived from Continuous GPS Observations (2010-2019). **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 382, p. 241–247, 2020.

ZHOU, C.; LAN, H.; BÜRGMANN, R.; et al. Application of an improved multi-temporal InSAR method and forward geophysical model to document subsidence and rebound of the Chinese Loess Plateau following land reclamation in the Yan'an New District. **Remote Sensing of Environment**, v. 279, n. June, p. 113102, 2022. Elsevier Inc. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113102>> . .

## ANEXO I – RESUMO ARTIGO 1 – JÁ PUBLICADO



Revista Brasileira de Cartografia  
 ISSN 1808-0936 | <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>  
 Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto



## Técnica PSInSAR™ na Avaliação de Deslocamentos: Análise Conceitual, Aplicações e Perspectivas

*PSInSAR™ Technique for Deformation Assessment: Conceptual Analysis, Applications, and Perspectives*

Sérgio da Conceição Alves <sup>1</sup>, Cláudia Pereira Krueger <sup>2</sup> e Regiane Dalazoana<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. [sergioalvesjq@gmail.com](mailto:sergioalvesjq@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0651-4742>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. [ckueger@ufpr.br](mailto:ckueger@ufpr.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4839-1317>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. [regiane@ufpr.br](mailto:regiane@ufpr.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5468-0679>

Recebido: mm.aaaa | Aceito: mm.aaaa

**Resumo:** *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR™)* é uma técnica de sensoriamento remoto que usa como base a técnica *Differential InSAR (DInSAR)*, porém, emprega uma série de interferogramas diferenciais advindas de uma pilha de imagens *Single Look Complex - Synthetic Aperture Radar (SLC-SAR)* devidamente corregradas e adquiridas em um intervalo de tempo sobre uma mesma área para, de tal modo, selecionar *pixels* que apresentam um índice de dispersão da amplitude dentro de um limiar estabelecido e, assim, gerar uma série histórica de deslocamento da superfície. A PSInSAR™ usa *pixels* que contenham dispersores persistentes que são caracterizados por obras de engenharia como pontes, taludes, telhados, casas, prédios, e algumas feições naturais como rochas. Por meio da análise da fase desses *pixels*, a PSInSAR™ consegue superar algumas dificuldades encontradas com a DInSAR, tais como, problemas correlacionados com a falta de correlação atmosférica, temporal e espacial. Desde a sua idealização no início dos anos de 2000 e devido a sua capacidade de mapear deslocamentos superficiais a uma acurácia milimétrica, a PSInSAR™ vem sendo amplamente usada em estudos sobre subsidências, deslizamentos, monitoramento de barragens, monitoramento de minas e de estruturas de engenharia no modo geral. Nesse sentido, o presente artigo descreve o princípio básico de funcionamento da técnica, investiga a sua aplicabilidade no âmbito nacional e internacional e apresenta os pacotes de processamento existentes no mercado assim como o acesso de dados interferométricos que possibilitam à utilização da PSInSAR™.

**Palavras-chave:** Interferometria. Monitoramento. Subsidência. Deslizamento.

**Abstract:** Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR™) is a remote sensing technique based on Differential InSAR (DInSAR) approaches. PSInSAR™ makes it possible to identify pixels that present stabilized phase related to the dispersion

index. These pixels contain dispersed permanent features as man-made structures which includes bridges, dams, the building roofs, buildings, houses, and some natural features such as rocks and quarries. Thus, by analyzing the phase of these pixels, PSInSAR™ can overcome some difficulties found in the DInSAR technique such as problems related to atmospheric, temporal, and spatial decorrelations. Since its inception in the early 2000s and due to its ability to map surface deformation with millimeter precision, PSInSAR™ has been widely used to recognize deformation in risk areas such as sink/uplift and landslides. Thus, this article sought to describe the basic principle of the PSInSAR™ technique, focusing on how it has been used in the national and international context. In addition, we also show some commercial and open-source packages for PSInSAR™ processing.

**Keywords:** Interferometry. Monitoring. Subsidence. Landslide.

## ANEXO II – RESUMO ARTIGO 2 – JÁ PUBLICADO

Employment of Free Packages for MT-InSAR Approaches to Verify the Subsidence Event over Maceió City, Brazil

*Emprego de Pacotes Gratuitos com Abordagens MT-InSAR para Verificar Subsidiências sobre a Cidade de Maceió, Brasil*

DOI: [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2023\\_46\\_56709](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_56709)

Sérgio da Conceição Alves<sup>1</sup> · Cláudia Pereira Krueger<sup>1,2</sup> · Regiane Dalazoana<sup>1,2</sup> · & Laurent Polidori<sup>3</sup> ·

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, PR, Brasil <sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná, Setor Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Curitiba, PR, Brasil <sup>3</sup>Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, PA, Brasil

E-mails: sergioalvesjq@gmail.com; ckrueger@ufpr.br; regiane@ufpr.br; laurent.polidori@ufpa.br

Corresponding author: Sérgio da Conceição Alves; sergioalvesjq@gmail.com

### Abstract

Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) technique employs a Multi-Temporal InSAR (MT-InSAR) approach to accurately measure subsidence. This technique, a type of Differential Interferometry (DInSAR), mitigates errors that traditional DInSAR techniques cannot, including temporal and geometric decorrelation, and phase unwrapping errors. In order to verify the subsidence process in the Pinheiro neighborhood of Maceio - Brazil following a 2018 earthquake, we tested free processing packages such as SNAP-StaMPS integration. Our investigation was conducted in two stages: first, using a stack of Sentinel-1A SLC- SAR (Single Look Complex-SAR) images acquired before and after the earthquake, and second, using more recent images to determine if the subsidence process is ongoing. Results from the first stage identified the area affected by subsidence and the second stage confirmed the continued presence of subsidence events. From 2017 to 2018, the subsidence process exhibited the highest displacement amplitude of -32.3 mm/year, whereas, between 2021 and 2022, the amplitude decreased to -24.09 mm/year, indicating a deceleration in the subsidence process.

**Keywords:** PSInSAR; Interferometry; SNAP-StaMPS

### Resumo

*Persistent Scatterer – Interferometric Synthetic Aperture Radar* (PSInSAR) é uma técnica que usa uma abordagem *Multi-Temporal Interferometric – SAR* (MT-InSAR). PSInSAR representa uma classe específica da técnica *Differential Interferometry – SAR* (DInSAR), mas tem uma grande vantagem por permitir mitigar erros, como perda de correlação geométricas e temporal e erros no desdobramento da fase, que o DInSAR se limita a resolver. Assim, testamos pacote de processamento gratuito, como a integração SNAP-StaMPS, para verificar o processo de subsidência na cidade de Maceió - Brasil. Nesta cidade, mais especificamente no bairro Pinheiro, vem ocorrendo subsidência desde a episódio de um terremoto em 2018. Nesse sentido, nossa investigação foi dividida em duas etapas: no primeiro teste aplicamos a técnica PSInSAR usando uma pilha de imagens *Single Look Complex – SAR* (SLC-SAR) do Sentinel-1A adquiridas antes e depois do terremoto; no segundo teste, utilizamos imagens adquiridas recentemente para analisar se há um processo de subsidência na área afetada. Como resultado, no

primeiro teste foi possível identificar a área que sofreu o processo de subsidência, assim como aconteceu no segundo teste, que também detectou o evento de subsidência. Durante o período de 2017-2018, registrou-se a maior amplitude de deslocamento de -32,3 mm/ano. No entanto, observou-se uma redução nesse valor para -24,09 mm/ano durante o período de 2021-2022, indicando um processo de desaceleração na subsidência.

**Palavras-chave:** PSInSAR; Interferometria; SNAP-StaMPS

Received: 31 January 2023; Accepted: 09 June 2023

## ANEXO III – RESUMO ARTIGO 3 – NÃO PUBLICADO



Revista Brasileira de Cartografia  
 ISSN 1808-0936 | <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>  
 Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto



## Emprego da Técnica PSInSAR™ como Ferramenta Complementar em Análise de Subsidiências. Caso de Estudo: Bairro Guabirota – Curitiba – PR.

*Employment of the PSInSAR™ Technique as a Complementary Tool in Subsidence Analysis. Study Case: Guabirota neighborhood – Curitiba – PR.*

Autor1<sup>1</sup>, Autor2<sup>2</sup>, Autor3<sup>3</sup> e Autor4<sup>4</sup> **Preencher após aceite**

- 1 Instituição, Cidade, País. E-mail. **Preencher após aceite**  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000> **Preencher após aceite**
- 2 Instituição, Cidade, País. E-mail. **Preencher após aceite**  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000> **Preencher após aceite**
- 3 Instituição, Cidade, País. E-mail. **Preencher após aceite**  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000> **Preencher após aceite**
- 4 Instituição, Cidade, País. E-mail. **Preencher após aceite**  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000> **Preencher após aceite**

Recebido: mm.aaa | Aceito: mm.aaa

**Resumo:** Para entender e monitorar adequadamente os riscos decorrentes de processos deformantes, como a subsidência, é fundamental identificá-los e, devidamente, avaliar a sua magnitude. O uso do GNSS é amplamente difundido para avaliar o panorama geral dessas instabilidades, seja por meio de posições absolutas ou medições contínuas dos pontos dentro das áreas afetadas. Já a técnica interferométrica em uma abordagem multitemporal (MT-InSAR), como a técnica PSInSAR™, permite monitorar e detectar pequenas variações no terreno causadas por movimentos da superfície, como deslizamentos de terra ou subsidência. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo complementar os resultados de uma análise de subsidência por meio de observações GPS realizada em uma região do bairro Guabirota, em Curitiba (PR), utilizando o processamento PSInSAR™ de 77 imagens SAR da missão Sentinel-1A, adquiridas no modo descendente durante o período de 2016 a 2019. Os resultados revelaram que as estações da rede GPS implantada no Guabirota apresentaram uma velocidade extremamente lenta quando projetadas na direção da linha de visada (LoS) do satélite. A projeção em LoS dos deslocamentos relativos das coordenadas (*north*, *east*, *up*) e das velocidades apresentou comportamentos semelhantes e divergentes em alguns pontos quando comparados aos resultados obtidos com a técnica PSInSAR™.

**Palavras-chave:** Subsidência. Interferometria. MT-InSAR. Sentinel-1A. SAR. GPS

**Abstract:** To understand the magnitude and danger of deforming agents, such as the subsidence process, it is essential to identify and monitor them adequately. The GNSS is widely used to assess the overall panorama of these instabilities, whether through absolute positions or continuous measurements of points within the affected areas. Interferometric

technique in a multitemporal approach (MT-InSAR), such as PSInSAR<sup>TM</sup>, allows monitoring and detecting small variations on the ground caused by surface movements, such as landslides or subsidence. In this sense, the present manuscript sought to complement the results of a subsidence analysis using GPS observations carried out in a region of Guabirota, a neighborhood in the city of Curitiba - PR. This complementation was made through the PSInSAR<sup>TM</sup> processing of 77 descending SAR images from the Sentinel-1A mission, acquired from 2016 to 2019. For comparison purposes, the velocities and displacements obtained with GPS were projected in the direction of the line of sight of the satellite of the master image used in the PSInSAR<sup>TM</sup> processing. As a result, it was observed that the GPS network stations implanted in Guabirota presented an extremely slow velocity when projected on the line-of-sight (LoS) of the satellite. The projection in LoS of the relative displacements of the coordinates (north, east, up) and velocities showed similar and divergent behaviors in some points when compared to the results obtained with the PSInSAR<sup>TM</sup> technique.

**Keywords:** Subsidence. Interferometry. MT-InSAR. Sentinel-1A. SAR. GPS

---