



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

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

Sérgio da Conceição Alves¹, Cláudia Pereira Krueger² e Regiane Dalazoana³

¹ Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. sergioalvesjq@gmail.com

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

² Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. ckueger@ufpr.br

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

³ Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. regiane@ufpr.br

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

Recebido: 06.2022 | Aceito: 01.2023

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.

1 INTRODUÇÃO

O Radar de Abertura Sintética, do inglês *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, é composto por um sensor ativo que é capaz de gerar sua própria energia eletromagnética na faixa das micro-ondas e, de acordo com Trevett (1986), conseguem realizar medições da superfície terrestre em condições adversas do clima e até

mesmo regiões cobertas por nuvens. A concepção de abertura sintética foi idealizada no ano de 1951 pelo engenheiro Carl Wiley, na empresa *Goodyear Aircraft Cooperation*, o qual observou que existia uma correlação direta entre a coordenada do alvo e o deslocamento instantâneo do sinal. Essa correlação foi denominada de *doppler beam-sharpening*, conhecida, também, como abertura sintética do sinal retroespalhado (WILEY, 1954; CURLANDER; MCDONOUGH, 1991; LASSWELL, 2005; FLORES-ANDERSON et al., 2019).

O primeiro projeto aplicando a tecnologia SAR para aplicações civis ocorreu em 1978. À vista disso, houve o desenvolvimento e lançamento do satélite orbital, o *Seafaring Satellite Mission* (SeaSat). O SeaSat foi colocado em órbita no dia 26 de junho de 1978, contudo, 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; POTTIER, 2016). Posteriormente outras missões foram lançadas, cita-se alguns exemplos: *European Remote Sensing* (ERS- 1/2); *Japanese Earth Resources Satellite* (JERS-1); *Environmental Satellite* (ENVISAT); *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS/PALSAR); RadarSat-1/2; TerraSAR-X/TanDEM-X e; até o presente momento, a missão Sentinel-1, lançada em 2014, com dados de acesso livre imageados na banda-C. O resumo das principais missões de satélites orbitais com sensores SAR pode ser encontrado em Paradella et al. (2015) e Flores-Anderson et al. (2019).

De acordo com Hanssen (2001), uma imagem SAR é formada por uma grade regular com valores complexos (*Single Look Complex* – SLC) que podem ser decompostos em fases e amplitudes. Quando se realiza uma multiplicação cruzada, *pixel a pixel*, de uma imagem complexa por um conjugado de uma segunda imagem, tem-se a formação de um interferograma. Sendo que o argumento dessa multiplicação, como aponta Ferretti et al. (2007), resulta na diferença de fase entre as duas imagens. A multiplicação cruzada entre duas imagens SLC-SAR permite a determinação da fase interferométrica, processo este conhecido como Interferometria SAR (InSAR). Graham (1974) foi pioneiro na utilização dessa técnica com dados advindos de um sistema SAR aerotransportado para gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE) de uma superfície terrestre.

Um MDE gerado com a técnica InSAR contém não apenas informações topográficas do terreno, mas, também, elementos de deslocamento desta superfície. Nesse sentido, Gabriel et al. (1989) utilizaram a Interferometria (InSAR) para medir o deslocamento de um terreno no Vale Imperial – Califórnia, empregando-se imagens SLC-SAR da missão SeaSat. No intuito de separar a fase de deslocamento da superfície da fase do terreno, Gabriel et al. (1989) aplicaram a técnica *Differential InSAR* (DInSAR) e, assim, obtiveram a fase de deslocamento no período de aquisição das duas imagens SLC-SAR. Essa técnica é amplamente usada em diversas aplicações tais como para detectar e medir movimentos de terrenos (CANO et al., 2011; VELAME et al., 2013; SILLERICO et al., 2015; BOHANE et al. 2015; LAKHOTE et al., 2020); deslizamentos (INFANTE et al., 2019; BUDETTA et al., 2020; ACOSTA et al., 2021); deformações sazonais do terreno (RUDY et al., 2018); monitoramento de minas (GAMBA et al., 2017; RODRIGUEZ-LLOVERAS et al., 2020); deslocamentos em regiões vulcânicas (DE NOVELLIS et al., 2019); dentre outras.

Em busca de uma melhor compreensão do deslocamento ao longo do tempo, a DInSAR passou a usar informações de uma pilha de imagens SLC-SAR adquiridas sobre o mesmo fenômeno de deslocamento, a qual ficou conhecida como *Advanced-DInSAR* (A-DInSAR). A A-DInSAR, de acordo Crosetto e Crippa (2005), usa um conjunto de imagens SAR para gerar uma pilha de interferogramas fornecendo uma descrição completa do deslocamento ao longo do tempo e, além disso, corrobora em análises estatísticas das observações DInSAR permitindo, desse modo, na solução e na estimativa de diferentes parâmetros os quais afetam na coerência da imagem SAR.

A técnica A-DInSAR 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 *Small Baseline Subset* (SBAS) (BERARDINO et al., 2002) e; ao considerar a dispersão de amplitude para seleção de *pixels* estáveis ao longo do tempo e, ainda, usar uma única imagem como mestre para gerar os interferogramas é denominada de *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar* (PSInSAR™) (NEGRÃO, 2018).

Nesse presente trabalho procurou-se apresentar o princípio matemático básico da técnica PSInSAR™; indicou-se, também, alguns pacotes de processamento, dando-se ênfase nos pacotes SNAP/STaMPS, os quais

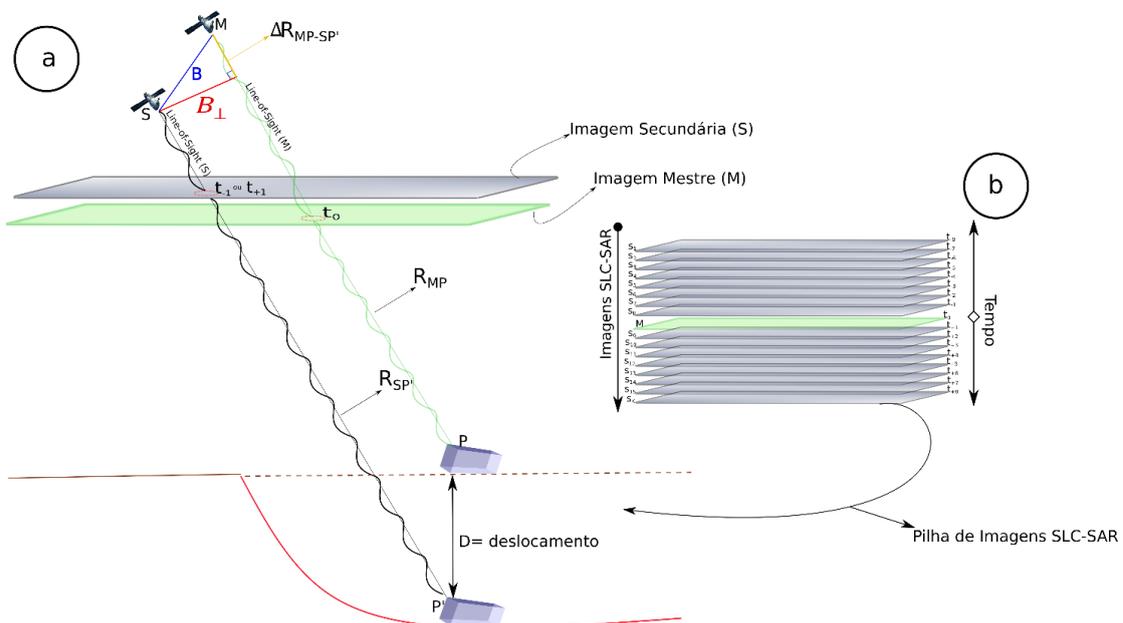
permitem realizar processamento interferométrico e; finalmente, a apresentação de alguns estudos nacionais e internacionais que empregaram a técnica PSInSAR™.

2 PRINCÍPIO MATEMÁTICO DA TÉCNICA PSINSAR™

Ferretti et al. (2000, 2001) desenvolveram a técnica PSInSAR™ a qual foi pioneira na solução completa para selecionar *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 Bernardino 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 corregradas (processo que visa realizar o alinhamento entre as imagens SAR e ocorre, de acordo com Li e Bethel (2008), em duas etapas: corregristo grosso com um nível de acurácia de um a dois *pixels* e; corregristo fino, com acurácia a um nível *subpixel*).

A técnica PSInSAR™, como Ferretti et al. (2007) aponta, utiliza uma multiplicação cruzada, *pixel a pixel*, entre duas imagens SLC-SAR para gerar a fase diferencial. Nesse processo, uma imagem SLC-SAR é selecionada como mestre (M) e a outra é denominada de escrava – aqui está sendo definida como secundária (S). Em síntese, a Figura 1 (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 1 (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 selecionada como mestre e as demais são admitidas como secundárias e, assim, formam-se os pares interferométricos.

Figura 1 - Representação geométrica da aquisição de duas imagens SLC-SAR (M e S).



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) usaram o critério de maximização da coerência entre a linha base temporal, a linha base perpendicular e a frequência do *doppler* entre todas as imagens SLC-SAR. Logo, essa coerência pode ser calculada por meio da Eq. (1).

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

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

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

onde $B_{\perp}^{k,M}$, $T^{k,M}$ e $f_{DC}^{k,M}$ são a linha de base espacial perpendicular, a linha de base temporal e a frequência do centroide *doppler* entre as imagens S e a imagem M , 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:

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

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).

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

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; 2π representa a ambiguidade da fase; $\frac{R_{SP} - R_{MP}}{\frac{\lambda}{4\pi}}$ é a fase topográfica (φ_{topo}), sendo λ o comprimento de onda do satélite e; φ_{restr_S} e φ_{restr_M} as fases do sinal restoespalhado do objeto P na imagem M e S , respectivamente.

Supõe-se 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 1a), – é possível transcrever a Eq. (4), conforme Crosetto et al. (2016), para a Eq. (5).

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

sendo $\frac{R_{SP'} - R_{MP}}{\frac{\lambda}{4\pi}}$ a fase do deslocamento (φ_{desl}) do objeto da posição P para P' na direção da linha de vista do satélite (*Line-of-Sight* – LoS, Figura 1a); os termos φ_{restr_S} e φ_{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 (φ_{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).

$$\varphi_{Int(x,K)} = \varphi_{desl(x,K)} + \varphi_{MDE(x,K)} + (\varphi_{Atm_S} - \varphi_{Atm_M})_{(x,K)} + (\varphi_{Orbita_S} - \varphi_{Orbita_M})_{(x,K)} + \varphi_{ruidos(x,K)} + 2\pi n_{(x,K)} \tag{6}$$

sendo $\varphi_{MDE(x,K)}$ o resíduo topográfico do *pixel* x no interferograma K ; φ_{Atm_S} e φ_{Atm_M} são as fases causadas pela atmosfera na época da aquisição das imagens S e M , respectivamente; φ_{Orbita_S} e φ_{Orbita_M} são as fases

do erro orbital que não foram devidamente mitigadas, mesmo após a aplicação da órbita precisa; a $\varphi_{ruidos(x,K)}$ representa o ruído da fase; o termo $2\pi n_{(x,K)}$ indica a ambiguidade da fase que não foi solucionada, sendo n o número de fases inteiras – 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 2π .

No geral, a PSInSARTM 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 calculado, 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).

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

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 $\varphi_{ruidos(x,K)}$ e $\varphi_{MDE(x,K)}$ são acatadas espacialmente não-correlacionadas. Para itens espacialmente não-correlacionados, como o $\varphi_{ruidos(x,K)}$ e $\varphi_{MDE(x,K)}$, 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 $\varphi_{ruidos(x,K)}$, tal como os erros advindos do corregristo 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).

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

A fase $\varphi_{MDE(x,K)}$, 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).

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

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

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

Logo, a determinação da fase $\varphi_{MDE(x,K)}$ torna-se um processo simples, pois esta tem uma correlação direta com $\varphi_{Int(x,K)}$, $\bar{\varphi}_{Int(x,K)}$, $B_{\perp(x,K)}$ e $\mathcal{F}_{MDE,x}$. De acordo com Hooper et al. (2004), as fases $\varphi_{Int(x,K)}$ e $\bar{\varphi}_{Int(x,K)}$ podem ser determinadas no próprio interferograma, a $B_{\perp(x,K)}$ através das órbitas precisas do sistema SAR e a constante $\mathcal{F}_{MDE,x}$ 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).

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

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.

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

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

2.1 Seleção dos *Pixels* Candidatos a PS

No intuito de obter a fase que tenha informações de deslocamento do terreno (φ_{dest}), 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 σ_A e μ_A sendo o desvio-padrão da 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 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's é estabelecida de uma forma iterativa, 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's 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.

2.2 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's, 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 A-DInSAR, que inclui a técnica PSInSAR™. Nesse sentido, a Tabela 1 apresenta alguns pacotes de processamento *open-source* e comerciais, mas nem todos são capazes de realizar processamentos A-DInSAR. 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 1 - Programas para processamento interferométrico.

Programa ¹	Pacote	Desenvolvedor ou Companhia
DORIS	<i>Open Source</i>	Kampes (1999); Kampes e Usai (1999)
ROI_PAC	<i>Open Source</i>	Rosen; Persaud (2000) e Rosen et al. (2004)
StaMPS/MTI	<i>Open Source</i>	Hooper; Zebker (2007) e Hooper (2008)
ISCE	<i>Open Source</i>	Roseu et al. (2012)
GMTSAR	<i>Open Source</i>	Sandwell et al. (2011)
GIANt	<i>Open Source</i>	Agram et al. (2013)
DePSI	<i>Open Source</i>	Leijen (2014)
LiCSBAS	<i>Open Source</i>	Morishita et al. (2020)
MintPy	<i>Open Source</i>	MintPy (s.d.); Yunjun et al. (2019)
SNAP	<i>Open Source</i>	ESA (s.d.)
GAMMA	Comercial	Werner et al. (2000), Wegnüller et al. (2016)
GEOMATICA	Comercial	Geomatica (2015)
ENVI SARscape	Comercial	Sarmap (2014), L3Harries (2021)
ERDAS IMAGINE	Comercial	Hexagon (2019)
SARPROZ	Comercial	Perissin et al. (2011); Perissin e Wang (2012); Perissin (2015)
DI-APASON	Comercial	Massonnet e Adragna (1997); Mora et al. (2016)

Fonte: Os autores (2022).

O pacote de processamento SNAP, por exemplo, foi desenvolvido pela *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.

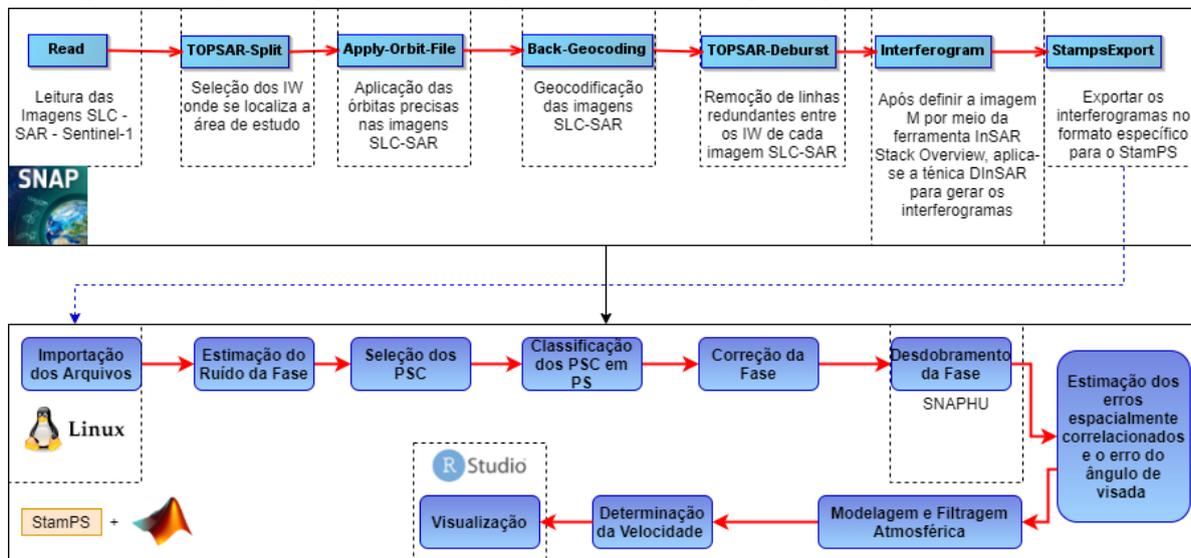
¹ *Delft object-oriented radar interferometric software* (DORIS); *Repeat Orbit Interferometry PACkage* (ROI_PAC); *Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal InSAR* (StaMPS); *InSAR Scientific Computing Environment* (ISCE); *Generic Mapping Tools* (GMTSAR); *Generic InSAR Analysis Toolbox* (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).

2.2.1 DEMONSTRAÇÃO DE UM PROCESSAMENTO PSINSAR™ USANDO O SNAP-STAMPS

Dado à gratuidade e da facilidade na sua utilização, o SNAP foi utilizado no processamento de imagens SLC do Sentinel-1 por meio da integração SNAP-StaMPS – as etapas desse processamento, baseadas em Blasco et al. (2019), podem ser observadas no diagrama apresentado na Figura 2. À vista disso, os dados de entrada considerados nessa demonstração foram obtidos no modo *Interferometric Wideswath (IW)*, onde foram escaneados, de acordo com De Zan e Guarneri (2006), em um sistema de medição progressivo chamado de *Terrain Observation with Progressive Scan (TOPS)*. Além disso, estes dados foram registrados na banda - C, mas, conforme observado em Paradella et al. (2015) e Flores-Anderson et al.(2019), as missões lançadas operam, na grande maioria, nas bandas X ($\lambda = 2,5$ a 4 cm), C ($\lambda = 4$ a 8 cm), S ($\lambda = 8$ a 15 cm), L ($\lambda = 15$ a 30 cm) e/ou P ($\lambda = 60$ a 120 cm). Uma característica importante de cada comprimento de onda converge-se na sua propriedade dielétrica, pois essa propriedade dita como o sinal de micro-ondas de um determinado comprimento de onda interage com uma determinada superfície. Essa interação, no entanto, se reflete na capacidade de espalhamento, de penetração e da absorção do sinal e, contudo, depende da umidade, da densidade (e.g. vegetação), bem como do comprimento de onda. 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 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 (MOREIRA et al., 2013).

A primeira etapa, conforme apresentada na Figura 2, foi executada dentro do ambiente SNAP, onde realizou-se a importação das imagens SLC-SAR e, posteriormente, a aplicação das órbitas precisas (processo automático de procura e *download*). Em seguida, fez-se a seleção dos IW – atentando-se que se tenha no mínimo duas subfaixas, as quais são formadas por eclosões (do inglês *burst*); em seguida, realizou-se o procedimento de correção 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, iniciou-se a etapa para a formação dos interferogramas diferenciais e, em seguida, a exportação destes no formato específico do StaMPS.

Figura 2 - Diagrama esquemático da integração SNAP-StaMPS para o processamento PSInSAR™.



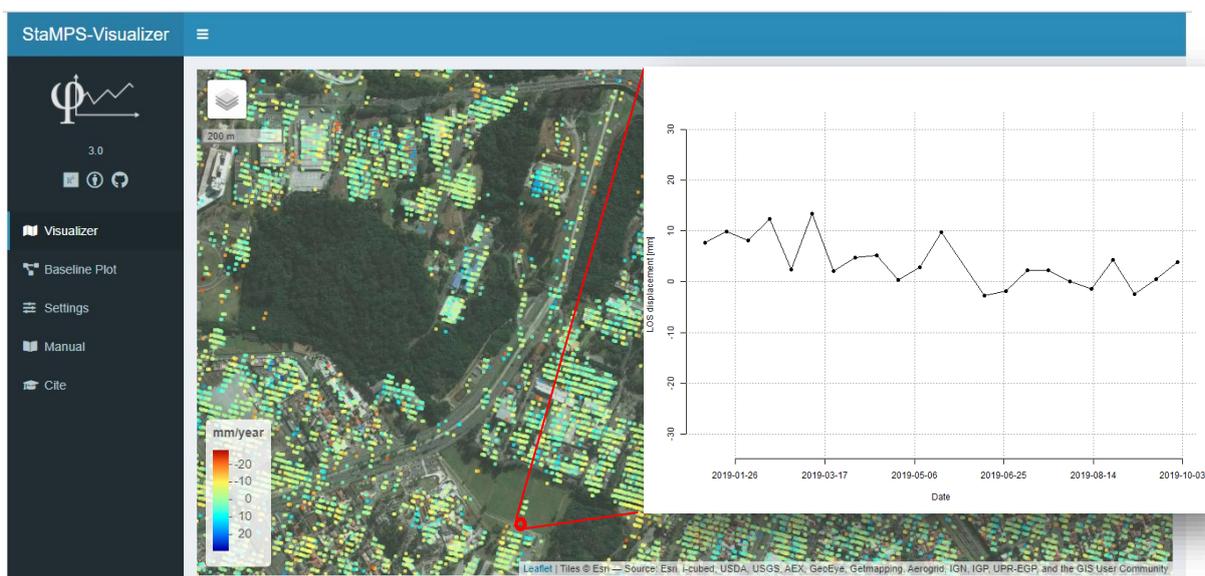
Fonte: Os autores (2022).

Na segunda etapa, os arquivos no formato do StaMPS foram colocados dentro de pastas específicas e, posteriormente, dentro do ambiente *Linux*, onde realizou-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®, estimou-se o ruído de fase de cada *pixel*; fez-se a seleção e a classificação dos PSC's; estabeleceu-se a correção da fase e o desdobramento desta por meio do SNAPHU – o qual deve ser instalado independente e configurar o StaMPS (*StaMPS_CONFIG.bash*) para

chamá-lo durante o processamento; realizou-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, determinou-se a taxa de deslocamento dos PS's. Maiores detalhes de cada etapa no StaMPS podem ser vistos em Hooper et al. (2018).

Portanto, a visualização da taxa de deslocamento dos PS's pode ser feita no próprio Matlab® ou através do visualizador desenvolvido por Hooser (2020) no R-Studio – o *StamPS-Visualizer*. Logo, a Figura 3 mostra o resultado advindo do processamento de 21 imagens SLC-SAR do satélite Sentinel - 1A. As imagens SLC-SAR foram obtidas no mês de janeiro até setembro de 2019 sobre a cidade de Curitiba – PR. Para remover a fase topográfica presente nos interferogramas, usou-se o MDE obtido por meio das observações advindas do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), cuja resolução usada foi de 1 arco segundo (aproximadamente 30 m). Utilizou-se esse MDE pois é um dos modelos de fácil acesso e pode ser acessado diretamente no SNAP, no entanto, ressalta-se que ao utilizar um MDE com uma melhor resolução, a fase topográfica será melhor representada e assim um resultado mais acurado será fornecido. Como resultado, cada ponto presente na Figura 3 contém informações temporais de deslocamento do dispersor, que se deu principalmente em áreas com construções de engenharia. Foram computados aproximadamente de 4031 PS/km² com uma taxa de deslocamento na direção da LoS que variou de ± 20 mm/ano – ressalta-se que esse resultado não foi validado.

Figura 3 - Resultado do processamento utilizando a técnica PSInSAR™ por meio do SNAP-StaMPS.



Fonte: Adaptada de Hooser (2020).

3 APLICAÇÕES DA TÉCNICA PSINSAR™

A seguir são apresentados alguns estudos nacionais e internacionais que envolveram a técnica PSInSAR™ como uma das ferramentas para gerar informações de deslocamento ao longo do tempo sobre uma determinada área. Contudo, os trabalhos apresentados a seguir foram publicados no período de 2000 a 2021, período este onde se deu a origem da tal técnica até o momento da elaboração desse manuscrito.

3.1 Aplicações no Brasil

A Tabela 2 reúne algumas pesquisas que foram desenvolvidas no Brasil que empregaram a técnica PSInSAR™ como ferramenta para gerar informações de deslocamento superficiais de uma certa área. Nota-se que a aplicação dessa técnica se deu principalmente em ambientes de extração de minérios, centrando em monitorar suas estruturas e o seu entorno.

Tabela 2 - Pesquisas Nacionais Envolvendo a Técnica PSInSAR™.

Autor	Aplicação	Localização	Missão ²	Pacote
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, Waldir R. 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: Os autores (2022).

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/km², 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 A-DINSAR em uma pilha de 24 imagens SLC-SAR. 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 ± 10 mm em cada um dos interferogramas diferenciais tanto no período seco quanto no período chuvoso.

Pinto (2015) empregaram 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/km² e 4680 PS/km² no período seco e úmido, respectivamente; sendo que a taxa de deslocamento (LoS) máxima obtida em alguns PS's 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

² TerraSAR-X satellite mission (TerraSAR-X); *Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation* (COSMO-SkyMed).

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/km² 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/km² 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 técnica 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's. 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 superficial 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/km² com valores máximo de subsidência de -0,95 cm/ano e, no período seco, uma densidade de 1942 PS/km² 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, os 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's 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 desabou. 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's comparados com os dados da estação-total/prisma, apresentaram valores médios que não extrapolaram o limite de estabilidade da empresa, de ± 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 A-DInSAR tal como a SBAS, a PSI (aqui definida como PSInSARTM), a *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA), a combinação da SBAS e com a IPTA e, finalmente, a SqueeSARTM.

3.2 Aplicações Internacionalmente

Desde Ferretti et al. (2000, 2001) a técnica PSInSARTM vindo sendo usada em diversas áreas tais como na necessidade de 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 PSInSARTM desde o início dos anos 2000 até o ano de 2021, porém, apenas as pesquisas consideradas de maior relevância foram incluídas na Tabela 3.

Tabela 3 - Pesquisas internacionais envolvendo a técnica PSInSARTM.

Autor	Aplicação	Localização	Missão ³	Pacote
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 TM
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/ ENVISAT	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 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

Continua

³ 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).

Autor	Aplicação	Localização	Missão ⁴	Pacote
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: Os autores (2022).

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/km² 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/km², 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.

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/km² contra 64,75 PS/km²). As velocidades médias encontradas pelos PS's 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's 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's 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* (Equador) usando 27 imagens SLC-SAR da

⁴ 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).

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/km²) 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 média, 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 km² 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/km²) 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's.

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 ± 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 km² 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 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's cuja taxa média de deslocamento ficou em ± 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 de 4000 km².

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 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 ± 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. O padrão de distribuição do deslocamento derivado de observações GNSS, segundo os autores, indicou um acúmulo do deslocamento relativamente maior comparada com a PSInSAR™.

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.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde a sua idealização até o presente momento, a técnica PSInSAR™ demonstra um grande potencial em estudos cujo objetivo se permeia na identificação e no monitoramento de deslocamentos superficiais, tanto em áreas urbanas quanto em áreas rurais. Mostrou-se, também, que é uma tecnologia madura e, além disso, uma ferramenta acessível onde permite a transferência de conhecimentos, especialmente para profissionais residentes em regiões onde o acesso à tecnologia é limitado. Torna-se uma técnica acessível pois, por meio de plataformas de acesso livre (e.g. SNAP e o STaMPS) o processamento de um conjunto de imagens SLC-SAR é exequível a qualquer pessoa que queira realizar um processamento interferométrico e análises de deslocamentos utilizando-se a técnica PSInSAR™. Destaca-se que, para empregar a tal técnica, é necessário que o usuário detenha um conhecimento mínimo sobre a tecnologia SAR e as suas técnicas de processamento.

Em contra partida, o processamento InSAR – especificadamente a técnica PSInSAR™ – exige um alto custo computacional. No processamento apresentado no item 2.2, foi utilizado uma pilha de 21 imagens SLC-SAR da missão Sentinel – 1A. Cada imagem apresenta uma resolução espacial de 5×20 m e um tamanho típico de aproximadamente 8GB/produto e, devido a isso, pode tornar um fator limitante para um processamento de um conjunto de dados SAR, pois, ao usar a PSInSAR™ com uma pilha de 21 imagens SLC-SAR, o processamento exigiria uma memória extra computacional – sem considerar com os produtos gerados durante o processamento – de no mínimo 168 GB.

Por outro lado, o enriquecimento no banco de dados com informações de fase e amplitude da superfície terrestre corrobora na ampliação das possibilidades de aplicação desse tipo de dado em análises no âmbito temporal de deformações superficiais. Atualmente existem dados das missões em acervos históricos acessíveis para a comunidade científica mundial tal como os dados das missões ERS-1/2 (1991-2001/1995-2011), ENVISAT (2002-2012), ALOS-1 (2006-2011), RADARSAT-1 (1995-2013) e JERS-1 (1995-1998) e; missões que ainda se encontram em operação como a PALSAR-2 (2014-), RADARSAT-2 (2007-), COSMO-SkyMed (2007-), PALSAR-2 (2014-), TerraSAR-X (2007-), TanDEM-X (2010-), Sentinel-1A/1B (2014-) e ALOS-2 (2014-). Contudo, outras missões estão para serem lançadas nos próximos anos tal como a NISAR (NASA-ISRO SAR), a TanDEM-L (DLR) e a missão BIOMASS (ESA) com destaque que este será o primeiro sensor SAR em banda-P orbital. A missão NISAR está sendo planejada para operar com sensor SAR na banda-L ($\lambda = 24$ cm) e na banda-S ($\lambda = 9$ cm) e os dados serão de livre acesso. Apesar das observações feitas na banda-L serem menos sensíveis às taxas de deslocamento quando comparada com as bandas X e C elas são mais eficientes na obtenção de imagens com boa coerência em áreas com baixa SNR como em áreas de florestas, por exemplo. Além disso, por apresentar um comprimento de onda grande, possibilitará o registro de deslocamentos com velocidades mais acentuadas, situações em que as bandas X e C não conseguiriam registrá-los devido a sua capacidade de penetração em dossel florestal. Em síntese, as bandas X e C são mais sensíveis a pequenas variações de deslocamentos comparadas com a banda L a qual é mais sensível às variações de maiores magnitudes.

Apesar de permitir a identificação de deslocamentos com boa acurácia na direção da LoS, a técnica InSAR, como aponta Polidori et al. (2013), não é tão acurada na direção ortogonal comparada com os resultados advindos de observações GNSS e/ou monitoramento envolvendo estação total/prisma. Com isso, a técnica PSInSAR™ torna-se uma ferramenta complementar para análises de deslocamentos superficiais juntamente com essas técnicas de monitoramento.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pela concessão da bolsa de estudo.

Contribuição dos Autores

O autor S.C.A. foi responsável pela conceptualização da pesquisa, curadoria e visualização dos dados, redigiu a minuta inicial e realizou revisões e edições. Os autores C.P.K. e R.D. realizaram as revisões iniciais.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

Referências

- ACOSTA, G.; RODRÍGUEZ, A.; EUILLADES, P.; et al. Detection of active landslides by dinsar in Andean Precordillera of San Juan, Argentina. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, n. January, p. 103205, 2021.
- 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. DOI: 10.1002/2013EO070001.
- 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. DOI: 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.
- BLASCO, J. M. D.; FOUMELIS, M.; STEWART, C.; HOOPER, A. Measuring urban subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, 2019.
- 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. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, XVII, 2015. **Anais...**
- 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. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.013.
- BUDETTA, P.; NAPPI, M.; SANTORO, S.; SCALESE, G. DinSAR monitoring of the landslide activity affecting a stretch of motorway in the Campania region of Southern Italy. **Transportation Research Procedia**, v. 45, n. 2019, p. 285–292, 2020. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.018.
- CANO, E. C.; MOLINA, O. D.; GRANADOS, H. D. Subsistencia y sus mapas de peligro : Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. **Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana**, v. 63, n. 1, p. 53–60, 2011.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- CROSETTO, M.; CRIPPA, B. State of the art of land deformation monitoring using differential SAR interferometry. **ISPRS Hannover ...**, 2005.
- 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). DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
- 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.
- CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic aperture Radar Systems and Signal Processing**. New York, 1991.
- DU, Z. **Mapping Earth Surface Deformation using New Time Series Satellite Radar Interferometry**, 2017. 226 p. Thesis (Doctor of Philosophy)- University of New South Wales, Sydney, Australia.
- 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. DOI: 10.1016/j.qsa.2021.100035.
- ESA. **Sentinel Application Platform - SNAP**. Disponível em: <<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>>. Acesso em: 19 jul. 2019.
- 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.
- 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.
- 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.
- FLORES-ANDERSON, A. I.; HERNDON, K. E.; THAPA, R. B.; CHERRINGTON, E. **The SAR Handbook**. NASA, 2019.

- 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.
- GAMBA, C. T. DE C.; ROSA, R. A. DA S.; NOGUEIRA JUNIOR, J. B. Identificação de processos erosivos às margens do rio Madeira (RO/AM) a partir da interferometria diferencial por radar (DINSAR). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. p.4750–4762, 2017. Campinas: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP.
- GEOMATICA. **Geomatica Training Guide: SAR Processing with Geomatica**. 2.3 ed. Canada, 2015.
- 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. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, XV, 2011. **Anais...**
- HANSSEN, R. F. **Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis**. 2º ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- HARTWIG, M. E. **Monitoramento De Taludes De Mineração Por Interferometria Diferencial com Dados Terrasar-X Na Amazônia: Mina De N4W, Serra De Carajás, Pará, Brasil**. 270 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2014.
- HERRING, T. A.; KING, R. W.; FLOYD, M. A.; MCCLUSKY, S. C.; SCIENCES, P. **GAMIT - Reference Manual**. 2018. Disponível em: < <http://geoweb.mit.edu/gg/docs.php>>. Acesso em: 19 out. 2022.
- HEXAGON. **Imagine SAR Interferometry**. 2019. Disponível em: < https://bynder.hexagon.com/m/5464f5882d827b32/original/Hexagon_GSP_IMAGINE_SAR_Interferometry_Product_Sheet.pdf>. Acesso em: 19 out. 2022.
- 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.
- HOESER, T. **StaMPS_Visualizer**. , 2020. Zenodo. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.4407188>>. Acesso em: 21 out. 2021.
- 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.; CUENCA, M. C.; ARIKAN, M. **StaMPS / MTI Manual**. , p. 44, 2018. Disponível em: < https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/StaMPS_Manual_v4.1b1.pdf>. Acesso em: 19 out. 2022.
- 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.
- INFANTE, D.; DI MARTIRE, D.; CONFUORTO, P.; et al. Assessment of building behavior in slow-moving landslide-affected areas through DInSAR data and structural analysis. **Engineering Structures**, v. 199, n. February, p. 109638, 2019. Elsevier. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109638.

- 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.
- KAMPES, B.; USAI, S. Doris: the Delft Object-oriented Radar Interferometric Software. **2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing**, 1999.
- 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. DOI: 10.1016/j.asr.2021.07.002.
- L3HARRIES. **ENVI® SARSCAPE® Process, analyze and solve problems with SAR data**. Broomfield, 2021. Disponível em: < <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape> >. Acesso em: 19 out. 2022.
- LAKHOTE, A.; THAKKAR, M. G.; KANDREGULA, R. S.; et al. Estimation of active surface deformation in the eastern Kachchh region, western India: Application of multi-sensor DInSAR technique. **Quaternary International**, , n. July, 2020. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.quaint.2020.07.010.
- 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.
- LEIJEN, F. VAN. **Persistent Scatterer Interferometry based on geodetic estimation theory**. 220 p. Tese (Geodesie en Geoinformatica). Delft University of Technology, Nederlands, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- MASSONNET, D.; ADRAGNA, F. Description of DIAPASON software developed by CNES current and future applications. **Workshop on ERS SAR Interferometry**, 1997.
- 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.
- MINTPY. **MintPy**. Disponível em: <<https://github.com/insarlab/MintPy>>. Acesso em: 19 jul. 2021.
- 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.
- 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. **Geocodificação Automática De Imagens De Radar De Abertura Sintética Interferométrico : Sistema Geo-InSAR**, 154 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas

- Espaciais - INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2001.
- 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.
- NEGRÃO, P. **Detecção de Deslocamentos Superficiais no Complexo Minerador de Germano, Marina-MG, Com Técnica Integrada de A-DINSAR Utilizando Dados TerraSAR-X**, 104 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2018.
- DE NOVELLIS, V.; ATZORI, S.; DE LUCA, C.; et al. DInSAR Analysis and Analytical Modeling of Mount Etna Displacements: The December 2018 Volcano-Tectonic Crisis. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 11, p. 5817–5827, 2019.
- OLIVEIRA, S. C.; ZÉZERE, 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.
- PARADELLA, WALDIR 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. DOI: 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.
- PARADELLA, WALDIR RENATO; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R. DOS; SILVA, G. G. DA. Radares Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, XVII, n. 1, 2015. **Anais...**
- 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.
- PERISSIN, D. Sarproz. **Sarproz.Com**, p. 7, 2015. Disponível em: <https://sarproz.com/publish/SARPROZ.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2019.
- 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.
- 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.
- 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.
- POLIDORI, L.; BACCI, P.-A.; SIMONETTO, E.; et al. On the potential of GPS-InSAR combination to improve the accuracy of ground deformation monitoring: simulation-based validation. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, XVI, v. 18, n. 1, p. 8467–8474, 2013. **Anais...**
- 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. DOI: 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.**

- 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- RODRIGUEZ-LLOVERAS, X.; PUIG-POLO, C.; LANTADA, N.; GILI, J. A.; MARTURIÀ, J. Two decades of GPS/GNSS and DInSAR monitoring of Cardona salt mines (NE of Spain) - natural and mining-induced mechanisms and processes. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 382, p. 167–172, 2020.
- 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.
- 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.
- 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.
- ROSEU, 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.
- RUDY, A. C. A.; LAMOUREUX, S. F.; TREITZ, P.; SHORT, N.; BRISCO, B. Seasonal and multi-year surface displacements measured by DInSAR in a High Arctic permafrost environment. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, n. August 2017, p. 51–61, 2018. Elsevier. DOI: 10.1016/j.jag.2017.09.002.
- 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.; 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. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.050.
- 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.
- SARMAP. **PS Tutorial**. 2014. Disponível em: < www.sarmap.ch/tutorials/PS_Tutorial_V_0_9.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2019.
- SILLERICO, E.; EZQUERRO, P.; MARCHAMALO, M.; et al. Monitoring ground subsidence in urban environments: M-30 tunnels under Madrid City (Spain). **Ingeniería e Investigación**, v. 35, n. 2, p. 30–35, 2015.
- 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.
- 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. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.021.
- 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. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.040 .
- 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.

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. **SPIDigitalLibrary**. September 2017, p. 40, 2017.

VELAME, M. G.; GAMA, F.; ESTE, R.; SUBSET, S. B.; TERRASAR-X, S. Estimativa de Deformação Vertical e Horizontal com o Uso de Interferometria Diferencial (DInSAR) em Órbitas de uma Mina de Ferro a Céu Aberto em Carajás-PA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIX, p. 483–486, 2013. **Anais...**

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.

WEGNÜLLER, U.; WERNER, C.; STROZZI, T.; et al. Sentinel-1 Support in the GAMMA Software. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 1305–1312, 2016. DOI: 10.1016/j.procs.2016.09.246.

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.

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.

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.

Biografia do autor principal



Sérgio da Conceição Alves é natural de Ponte Nova, MG – Brasil. Possui graduação em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (2017). Mestrado em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná com ênfase em Levantamentos Hidrográficos e Geodésicos (2019). Atualmente é doutorando no programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná, em Curitiba. Tem interesse nos seguintes temas: Levantamentos Batimétricos; Interferometria com imagens SAR e; Posicionamento GNSS.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.