



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

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

Sérgio da Conceição Alves<sup>1</sup>, Regiane Dalazoana<sup>2</sup>, Cláudia Pereira Krueger<sup>3</sup> e Laurent Polidori<sup>4</sup>

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

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

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

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

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

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

<sup>4</sup> Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. [laurent.polidori@ufpa.br](mailto:laurent.polidori@ufpa.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6220-9561>

Recebido: 05.2023 | Aceito: 11.2023

**Resumo:** Para entender e monitorar adequadamente os riscos decorrentes de processos deformantes, como a subsidência, é fundamental identificá-los e avaliar sua magnitude adequadamente. O uso do GNSS é amplamente difundido para avaliar o panorama geral dessas instabilidades, seja por meio de posições absolutas ou medições contínuas dos pontos dentro das áreas afetadas. Por outro lado, a técnica interferométrica em uma abordagem multi-temporal (MT-InSAR), como a técnica PSInSAR, permite monitorar e detectar pequenas variações no terreno causadas por movimentos da superfície, como deslizamentos de terra ou subsidência. Nesse sentido, este manuscrito tem como objetivo complementar os resultados de uma análise de subsidência por meio de observações GPS realizadas em uma região do bairro Guabirota, em Curitiba (PR), utilizando o processamento interferométrico empregando a técnica PSInSAR com base em 77 imagens SAR do satélite Sentinel-1A, adquiridas na órbita descendente durante o período de 2016 a 2022. Os resultados revelaram que as estações da rede GPS implantada no Guabirota apresentaram uma velocidade extremamente lenta quando projetadas na direção da linha de visada (LoS) do satélite. A projeção na LoS dos deslocamentos relativos das coordenadas (*north*, *east*, *up*) e das velocidades apresentou comportamentos semelhantes e, em alguns pontos, divergentes quando comparados aos resultados obtidos com a técnica PSInSAR.

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

**Abstract:** To understand the magnitude and danger of deforming agents, such as the subsidence process, it is essential to identify and monitor them adequately. The GNSS is widely used to assess the overall panorama of these instabilities, whether through absolute positions or continuous measurements of points within the affected areas. Interferometric technique in a multi-temporal approach (MT-InSAR), such as PSInSAR, allows monitoring and detection of small variations on the ground caused by surface movements, such as landslides or subsidence. In this sense, the present manuscript sought to complement the results of a subsidence analysis using GPS observations carried out in a region of Guabirota, a neighborhood in the city of Curitiba - PR. This complementation was made through the PSInSAR processing of 77 descending SAR images from the Sentinel-1A satellite, acquired from 2016 to 2022. For comparison purposes, the velocities and displacements obtained with GPS were projected in the direction of the line of sight of the satellite of the master image used in the PSInSAR technique processing. As a result, it was observed that the GPS network stations implanted in Guabirota presented an extremely slow velocity when projected on the line-of-sight (LoS) of the satellite. The projection in LoS of the relative displacements of the coordinates (*north*, *east*, *up*) and velocities showed similar and divergent behaviors at some points when compared to the results obtained with the PSInSAR technique.

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

# 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Du (2017), a subsidência em áreas urbanas tem duas fontes principais: uma causada por atividades humanas e outra motivada por eventos naturais. A subsidência resultante de atividades humanas é causada pelo colapso da estrutura geológica, que pode ser resultante de diversas ações tal como por mineração subterrânea, extração de recursos naturais, construção de túneis subterrâneos e pressões exercidas por construções sobre uma determinada área. Por outro lado, a subsidência provocada por eventos naturais pode ser consequência de deformações causadas por terremotos ou erupções vulcânicas. No geral, esses tipos de alterações do solo podem causar graves consequências na infraestrutura urbana e afetar a segurança e integridade física das pessoas que ali residem.

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

Outra forma para detectar e monitorar subsidência é o uso de técnicas de sensoriamento remoto como o emprego da interferometria de imagens radar de abertura sintética (*Interferometry Synthetic Aperture Radar* – InSAR) com uma abordagem multi-temporal (*Multi-Temporal InSAR* – MT-InSAR). A MT-InSAR, no entanto, combina múltiplas imagens de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR) capturadas em diferentes momentos para acompanhar mudanças na superfície e quantificar a deformação ocorrida entre as imagens (SINGH VIRK; SINGH; MITTAL, 2018). Essa técnica é útil para uma variedade de aplicações, incluindo o monitoramento da atividade vulcânica (PELTIER et al., 2010), a detecção de subsidências e/ou elevações (RUIZ-ARMENTEROS et al., 2018), mapeamento do movimento do solo causado por terremotos (ALATZA et al., 2020), mineração (DECLERCQ et al., 2023; DING et al., 2022; LU et al., 2019; TEMPORIM et al., 2017) e outros processos geológicos (LIU et al., 2023; LUO; LI; ZHANG, 2022; GUO et al., 2017; CZIKHARDT et al., 2017). Atualmente existem diversas técnicas que empregam uma abordagem MT-InSAR, tais como a *Coherent Pixel Technique* (CPT) (BLANCO-SÁNCHEZ et al. 2008), *Small Baseline Subset* (SBAS) (BERARDINO et al., 2002), *SqueeSAR* (FERRETTI et al., 2011), *Target Point Interferometric Analysis* (IPTA) (WERNER et al. 2003), *SARPROZ* (PERISSIN et al., 2011), *Stanfords Method for Persistent Scatterers* (StaMPS) (HOOPER et al., 2010), *Persistent Scatterer Interferometric* (PSI ou PSInSAR) (FERRETTI, PRATI e ROCCA. 2000, 2001), dentre outras.

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

Nesse contexto, este manuscrito procurou complementar os resultados obtidos por Werlich (2017) e Amagua et al. (2022) empregando-se uma abordagem MT-InSAR, por meio da técnica PSInSAR, como ferramenta de processamento interferométrico. Werlich (2017) conduziu um estudo envolvendo o uso do *Global Positioning System* (GPS) no bairro Guabirotuba, localizado em Curitiba, Brasil. Nessa área, observaram-se indícios de movimento do solo, evidenciados pelo surgimento de rachaduras em casas, que, em

um caso específico, levou à demolição de uma residência na região. Com isso, a autora desenvolveu sua pesquisa materializando uma rede de monitoramento GPS para acompanhar as coordenadas geodésicas dos pontos ao longo do tempo e quantificar esse fenômeno. Através de nove campanhas GPS realizadas entre os anos de 2014 e 2019, Werlich (2017) e Amagua et al. (2022) identificaram algum tipo de movimento, que foi correlacionado com a formação geológica daquela região.

## 2 A TÉCNICA PSINSAR E O GNSS NA DETECÇÃO DE MOVIMENTO DE MASSAS

### 2.1 Princípios Básicos das Imagens SAR e da Técnica PSInSAR

O SAR é um sistema composto por sensores ativos que são capazes de gerar sua própria energia eletromagnética na faixa das micro-ondas. Essa capacidade permite ao sistema detectar objetos e características em superfícies, independentemente das condições climáticas ou de iluminação (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991). Uma imagem SAR é composta por *pixels* associados a áreas específicas na superfície terrestre. Em termos gerais, cada *pixel* fornece informações expressas por um vetor complexo, que inclui a amplitude ( $A$ ), a frequência ( $f$ ) e a fase ( $\varphi$ ) do sinal retroespalhado por todos os alvos presentes na célula de resolução correspondente (FERRETTI et al., 2007).

Quanto às bandas em que os sistemas SAR operam, eles podem trabalhar em várias frequências, como Ka, K, Ku, X, C, S, L e P, por exemplo. Cada banda, no entanto, opera em uma frequência e/ou comprimento de onda específicos, e pode ser classificada de acordo com a Tabela 1, conforme indicado por Moreira et al. (2013).

Tabela 1 - Classificação das Bandas e suas Frequências e Comprimento de Onda.

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

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

Uma característica crucial de cada comprimento de onda é a sua interação com um objeto específico que possui uma propriedade dielétrica particular. Essa propriedade dita como o sinal das micro-ondas de um determinado comprimento de onda, interage com uma determinada superfície e essa interação se reflete na capacidade de espalhamento, de penetração e da absorção do sinal – essa interação depende ainda da umidade do solo e da densidade da vegetação. No contexto da capacidade de interação e penetração do sinal das 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 alcançar o solo ou mesmo o subsolo (HERNDON et al., 2020; HANSEN, 2001).

O processamento de imagens SAR pode ser estabelecido empregando-se uma abordagem MT-InSAR, como por exemplo, a técnica PSInSAR. Essa técnica possibilita monitorar de forma precisa e contínua os deslocamentos do terreno ao longo do tempo, sendo especialmente útil para detectar deformações em grandes áreas, como zonas urbanas ou espaços abertos, sujeitas a movimentos de massa, como deslizamentos de terra e subsidências. A PSInSAR utiliza um conjunto de  $K+1$  imagens SAR (devidamente corregradas) adquiridas em um intervalo de tempo ( $t_0, t_1, t_2, \dots, t_K$ ) para medir a diferença de fase entre os sinais emitidos e refletidos pela superfície da Terra. Dentro desse conjunto, uma imagem é selecionada como mestre (M), enquanto as demais são definidas como secundárias (S), também conhecidas como *slave* (escravas). A diferença de fase é obtida pela multiplicação cruzada entre as imagens S e a imagem M, permitindo calcular a distância entre a antena do radar e a superfície da Terra com alta precisão. A seleção da imagem M baseia-se, segundo Hooper, Segall e Zebker (2007) e Liu et al. (2008), no critério da maximização da coerência entre a linha base temporal,

a linha base perpendicular e o *doppler* entre todas as imagens SAR. Logo, essa coerência pode ser calculada por meio da Eq. (1).

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

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

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

com  $B_{\perp}^{k,M}$ ,  $T^{k,M}$ ,  $f_{DC}^{k,M}$  são a linha de base espacial perpendicular, a linha de base temporal e a diferença do centroide da frequência *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  $g$  significa a coerência e;  $k$  a imagem SAR usadas no processamento.

Ao contrário de outras técnicas de interferometria SAR, a técnica PSInSAR utiliza pontos de referência persistentes – denominados de *Persistent Scatterer* (PS) (e.g. edifícios, casas, solos expostos, pontes, etc.) – como referência para medir deslocamentos ao longo do tempo. Esses pontos de referência são escolhidos com base em sua alta coerência temporal e espacial, ou seja, sua capacidade de refletir consistentemente os sinais do radar ao longo do tempo e que não tenha sofrido mudanças abruptas na sua posição espacial. Cada PS, no entanto, apresenta um deslocamento registrado na direção da linha de visada do satélite (também conhecida como *Line-of-Sight* ou LoS) e sua velocidade, contudo, é expressa em milímetros por ano. As velocidades com sinal negativo, conforme apontado por Carlà et al. (2018) e Zhang et al. (2020), assinalam um processo de subsidência do objeto em análise, enquanto velocidades com sinal positivo indicam uma elevação do mesmo.

A equação básica da técnica PSInSAR pode ser escrita resumidamente conforme a Eq. (3), a qual apresenta a fase diferencial interferométrica ( $\Delta\varphi$ ) obtida por meio da multiplicação cruzada entre as imagens S e a imagem M (CROSETTO et al., 2016; COLESANTI et al., 2003):

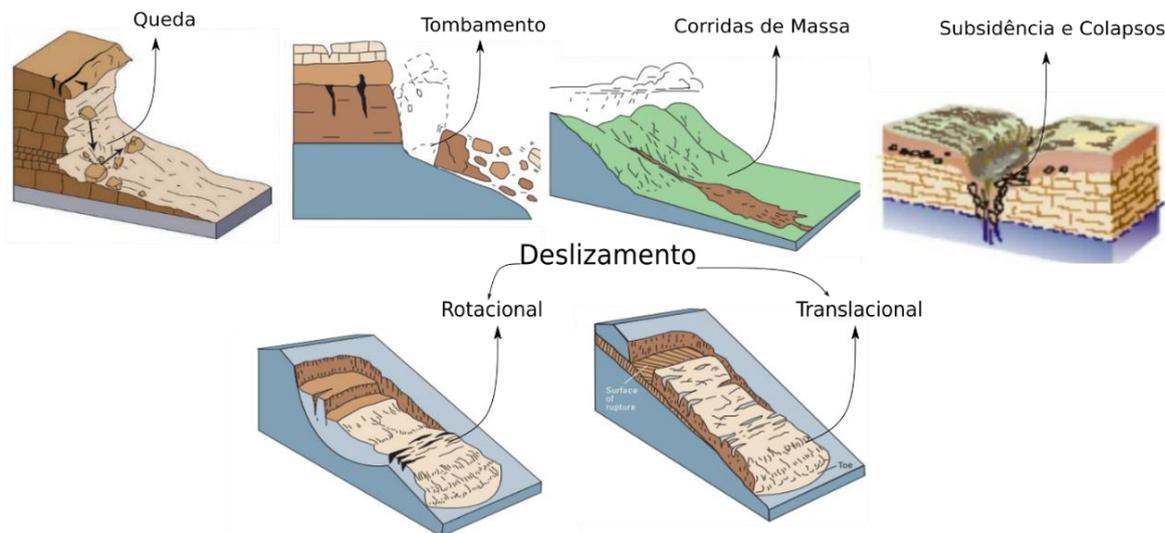
$$\Delta\varphi = \varphi_{Displ} + \varphi_{Topo_{res}} + (\varphi_{Atm_S} - \varphi_{Atm_M}) + (\varphi_{Orb_S} - \varphi_{Orb_M}) + \varphi_{Ruido} + 2n\pi \quad (3)$$

sendo  $\varphi_{Displ}$  a fase que representa o deslocamento do objeto,  $\varphi_{Topo_{res}}$  a fase residual advinda do modelo digital do terreno para simular a fase topográfica,  $\varphi_{Atm}$  a fase atmosférica das imagens S e M,  $\varphi_{Orb}$  representa o erro orbital,  $\varphi_{Ruido}$  o ruídos da fase e outros erros que não foram modelados (e.g. erro térmico causado pela mudança de temperatura dos equipamentos),  $2n\pi$  indica a ambiguidade da fase que não foi solucionada, sendo  $n$  o número de fases inteiras.

## 2.2 Movimento de Massas e o Processo de Subsidência

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008) o movimento de massa – também conhecido como deslizamento, queda de barreiras ou ruptura de barreiras – descreve o movimento descendente do solo, rochas e/ou materiais orgânicos ocasionado pelo efeito da gravidade, que normalmente é potencializado pela ação da água. Estes movimentos, conforme o mesmo autor explana, podem ser classificados em quatro tipos principais: quedas/tombamentos/rolamentos; deslizamentos; corrida de massa e; subsidência e colapsos (Figura 1).

Figura 1 - Alguns Tipos de Movimento de Massa.



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

À vista disso, a subsidência e os colapsos do solo, como apontam Vestena, Kobiyama e Santos (2002), são decorrentes do grau de dissolução da rocha, caracterizados por afundamento rápido ou gradual do terreno devido ao colapso de cavidades que podem ocorrer mesmo sem sinais prévios denunciadores e, assim, trazer riscos e prejuízos econômicos e até mesmo perdas de vidas humanas.

### 2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DO MOVIMENTO DE MASSA QUANTO À SUA VELOCIDADE

Há diversos métodos propostos ao longo dos anos para classificar os movimentos de massa, no entanto, o modelo estruturado por Varnes em 1978 é o mais adotado internacionalmente, o qual, de acordo com Cruden e Varnes (1996), estabelece uma escala de movimento conforme o Sistema Internacional de Unidades, variando de metro por segundo até o milímetro por ano. Varnes (1958) não discutiu a divisão da escala, todavia, utilizava unidades que variavam de pé por segundo até pé por 5 anos. A Tabela 2 apresenta a classificação de Cruden e Varnes (1996).

Tabela 2 - Escala de Velocidades de Deslizamentos.

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

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

Devido à ambiguidade na fase dos dados SAR adquiridos nas bandas C e X, a análise do movimento de massa com a técnica PSInSAR é restrita a fenômenos que variam de 'extremamente lentos' a 'muito lentos'. Essa ambiguidade está relacionada à natureza ambígua das fases interferométricas, que são envolvidas ou dobradas em valores múltiplos de  $2\pi$  (consulte Eq. 3). Isso ocorre quando a diferença de fase é menor que  $\pi$ , o que corresponde a uma deformação menor que um quarto do comprimento de onda empregado. Como resultado, a capacidade de identificar movimentos fica limitada a aproximadamente um quarto do comprimento de onda entre duas aquisições consecutivas de dois PS próximos no mesmo conjunto de dados (HANSSEN, 2005; CROSETTO et al., 2010). Consequentemente, as velocidades derivadas do processamento com a técnica PSInSAR dependem dos comprimentos de onda e do tempo de revisitação do satélite. Com isso, análises empregando dados advindos de sensores que trabalham nas bandas C e X, conforme apresentado na Tabela 2,

ficam limitadas às velocidades mencionadas anteriormente. Adicionalmente, sensores da banda L, que possuem um comprimento de onda maior, como observado por Frangioni (2014), têm a capacidade de medir movimentos com velocidades de até 45 cm/ano.

### 2.3 Uso do GNSS em Análise e Monitoramento de Subsidiências

Para compreender a magnitude e o perigo decorrente dos agentes deformantes, como o processo de subsidência, é essencial identificá-los e monitorá-los adequadamente. O GNSS, que é um sistema de navegação via satélite que fornece informações de localização, tempo e velocidade aos usuários em todo o mundo, é amplamente utilizado em atividades de monitoramento por meio de posições absolutas, obtidas em diferentes épocas de medição, ou ainda por meio de medições contínuas em pontos localizados nas áreas afetadas. O GNSS mais conhecido é o GPS, desenvolvido e operado pelos Estados Unidos. Contudo, há outros sistemas GNSS, tais como o GLONASS (Rússia), o Galileo (União Europeia), o BeiDou (China) e o NavIC (Índia).

Existem vários métodos para adquirir dados GNSS, incluindo o Posicionamento por Ponto (PP), o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), os posicionamentos diferenciais (DGPS e RTK) ou relativos em tempo real ou pós-processadas em linha de base ou em rede. Dependendo da dinâmica do objeto, esses métodos podem ser classificados como estáticos, quando o objeto está em repouso (absoluto/relativo estático), ou cinemáticos, quando o objeto está em movimento (absoluto/relativo cinemático). Por exemplo, ao utilizar o método estático para coletar dados GNSS de um objeto em diferentes épocas, é possível gerar séries temporais que permitem detectar possíveis variações na posição do objeto em questão. A Tabela 3 apresenta alguns estudos que envolveram observações GNSS com o intuito de identificar e monitorar o fenômeno de subsidência de solo.

Tabela 3 - Estudos que Envolveram Observações GNSS para Detectar Subsidiências.

Autor	# Estações	Tempo Observação	Método	Software
Bramanto et al. (2023)	200	24 h	Relativo	GAMIT/GLOBK
Wang et al. (2022)	255	24 h	Relativo	GipsyX/RTGx
De Luna et al. (2021)	4	~9 h	Relativo	Topcon Tools
Cenni, Faschi e Fabris (2021)	5	24 h	Relativo	GAMIT/GLOBK
Zhao et al. (2020)	8	24 h	PPP	GipsyX
Wang et al. (2020)	55	24 h	PPP	MIDAS
Andreas et al. (2019)	50	10 h	Relativo	Bernese
Yuwono, Awaluddin e Najib (2019)	32	6 h	Relativo	-
Choudhury et al. (2018)	-	24 h	Relativo	GAMIT/GLOBK
Sneed e Brandt (2013)	13+20	2,5 a 6,5 h	Relativo	-
Ustun, Tusat e Yalvac (2010)	6	8 –10 h	Relativo	GAMIT/GLOBK
Abidin et al. (2001)	12	9 – 10 h	Relativo	Bernese

Fonte: Os autores (2023).

### 2.4 Uso do InSAR e do GNSS para Análises de Subsidiências

Combinando os resultados da técnica PSInSAR e do processamento das observáveis do GNSS, é possível obter uma visão mais completa das deformações na superfície terrestre, permitindo o monitoramento de subsidências com ainda mais acurácia. Enquanto o GNSS fornece dados contínuos ao longo do tempo, garantindo alta resolução temporal, o SAR, por outro lado, contribui com dados de alta resolução espacial. Essa combinação de tecnologias pode levar a uma análise mais crítica e precisa do movimento da superfície terrestre, conforme apontado por Hu et al. (2018).

Del Soldato et al. (2021) apresentaram o estado da arte das várias aplicações utilizando a combinação dessas duas técnicas no continente europeu, destacando a utilidade e versatilidade dessa abordagem combinada. A Tabela 4 apresenta alguns exemplos de estudos que empregaram o GNSS e a técnica interferométrica para detectar e monitorar subsidências.

Tabela 4 - Estudos que Envolveram Estudos com InSAR e GNSS para Analisar Subsidências.

Autor	Localização	Missão	Técnica
Dumka et al. (2021)	Índia	Sentinel-1A	GNSS + PSInSAR
Parizzi, Gonzales e Brcic (2020)	Holanda	Sentinel-1A/B	GNSS + InSAR
Hu et al. (2018)	Estados Unidos	PALSAR-1	GNSS + InSAR
Hastaoglu (2016)	Turquia	Envisat	GNSS + PSInSAR
Zhu et al. (2014)	China	TerraSAR	GNSS + InSAR
Simonetto et al. (2014)	França	ERS	GNSS+InSAR
Yin et al. (2010)	China	RADARSAT-1	GPS + InSAR
Droz et al. (2008)	China	Envisat	GNSS + PSInSAR

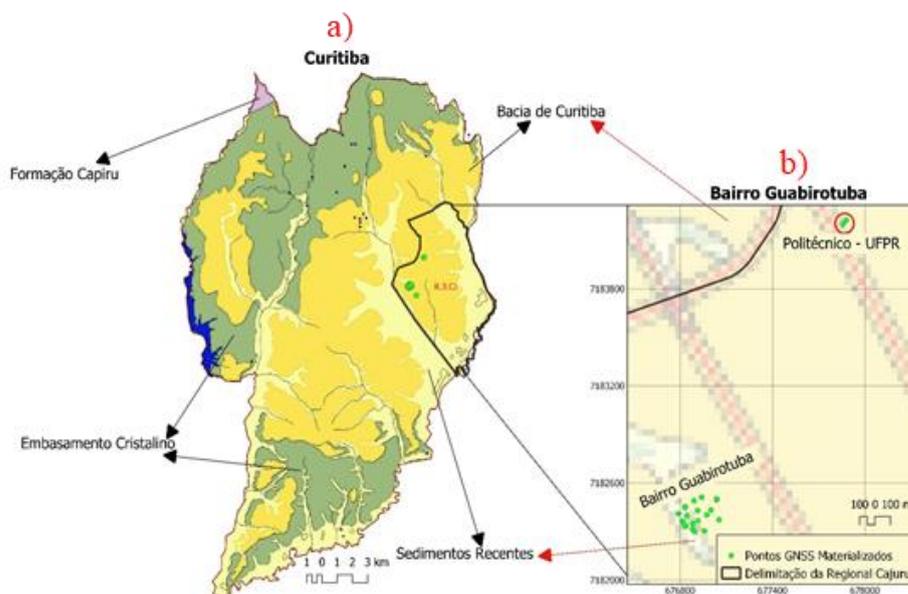
Fonte: Os autores (2023).

### 3 ÁREA DE ESTUDO E A REDE GPS MATERIALIZADA NO BAIRRO DO GUABIROTUBA

A área de estudo está localizada no bairro Guabirotuba, que faz parte da cidade de Curitiba - Paraná. De acordo com o IBGE (2021), a cidade Curitiba ocupa uma área de 434,892 km<sup>2</sup> e possui uma população de 1.751.907 habitantes (censo de 2010), distribuídos em 75 bairros gerenciados por 10 regionais. A cidade é principalmente situada sobre o aquífero Guabirotuba (Figura 2), que, de acordo com Rosa Filho et al. (2002), consiste em lentes de areias arcoseanas intercaladas nos sedimentos pelíticos da bacia de Curitiba (argilitos e siltitos), cobrindo uma área de cerca de 400 km<sup>2</sup> na Região Metropolitana de Curitiba (RMC). A sua formação geológica é composta principalmente por quatro compartimentos: Bacia de Curitiba, Formação Capiru, sedimentos recentes e Embasamento Cristalino (SALAMUNI, 1998).

Segundo Salamuni (1998), a Bacia de Curitiba é composta por diferentes unidades lito-estratigráficas, sendo parte constituída por embasamentos e sedimentos. Os sedimentos ocupam uma área de 3.000 km<sup>2</sup> e são compostos basicamente por argilas e areias arcossianas (20 - 40% de feldspato) (DE LIMA et al., 2013). Essa formação de sedimentos, segundo Felipe (2011), é conhecida como Formação Guabirotuba e corresponde à deposição de sedimentos ocorrida durante um período de 23 a 1,8 milhões de anos. Esses sedimentos são encontrados na Região Metropolitana e no município de Curitiba, principalmente na Regional Cajuru, mais especificamente no bairro Guabirotuba (Figura 2b), onde Werlich (2017) materializou pontos de uma rede GPS para monitorar movimentos de massa naquele bairro. Nessa mesma região, pode-se observar a presença da formação de Sedimentos Recentes, o qual aparece em todas as regiões, especialmente nos vales banhados pelos rios e outras categorias de depósitos que não se consolidaram. É formada principalmente por aluviões, argilitos, arcósios, areias, cascalhos e turfeiras e cobre uma área de 6377 km<sup>2</sup>, correspondendo a 3,2% da área total do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2001).

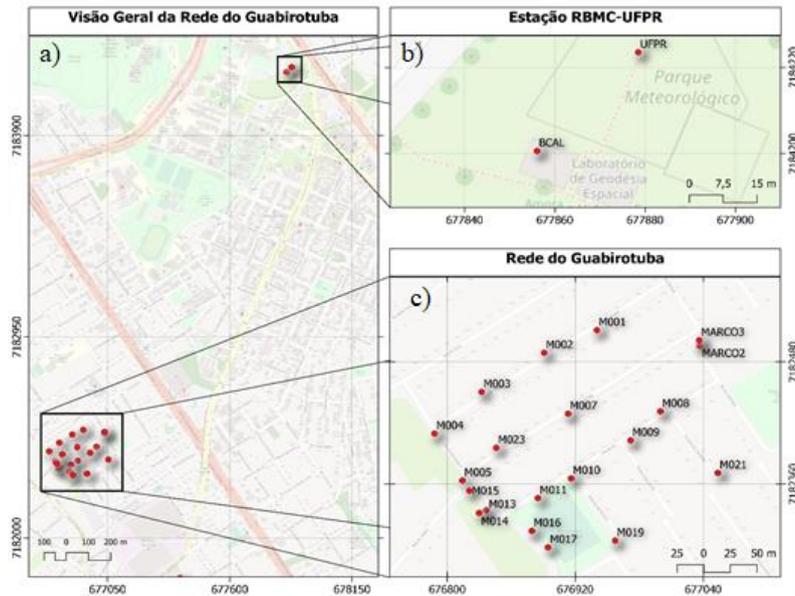
Figura 2 - Folha Geológica de Curitiba.



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

O trabalho desenvolvido pela pesquisadora Werlich (2017) teve como objetivo a investigação de estratégias de processamentos de dados GPS com o intuito de monitorar uma área urbana instável. Para alcançar esse objetivo, uma rede GPS foi materializada no bairro do Guabirota, sendo que a autora realizou nove levantamentos GPS no período de 2014 a 2019. A Figura 3a apresenta a localização da rede em relação ao Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR); Figura 3b mostra a estação UFPR pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC); e a estação BCAL usada para calibrar as antenas GNSS e; Figura 3c exibe a distribuição espacial dos pontos materializados no bairro do Guabirota.

Figura 3 - Rede GPS Materializado no Bairro do Guabirota (Curitiba - PR).



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

Werlich (2017) identificou pontos em uma área com potencial processo erosivo. Na Figura 4, três pontos importantes da área de estudo são destacados, onde questões viárias e estruturais relacionadas a possíveis processos de deslizamento de terra podem ser observadas. Por exemplo, nas Figura 4a e 4b, é possível ver rachaduras nas paredes de duas casas, provavelmente causadas por deslizamentos de terra e detritos. A Figura 4c mostra o colapso da estrada que passa sobre o Rio Guabirota.

Figura 4 - Evidência de Processo de Subsidência no Bairro do Guabirota – Curitiba.



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

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

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

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

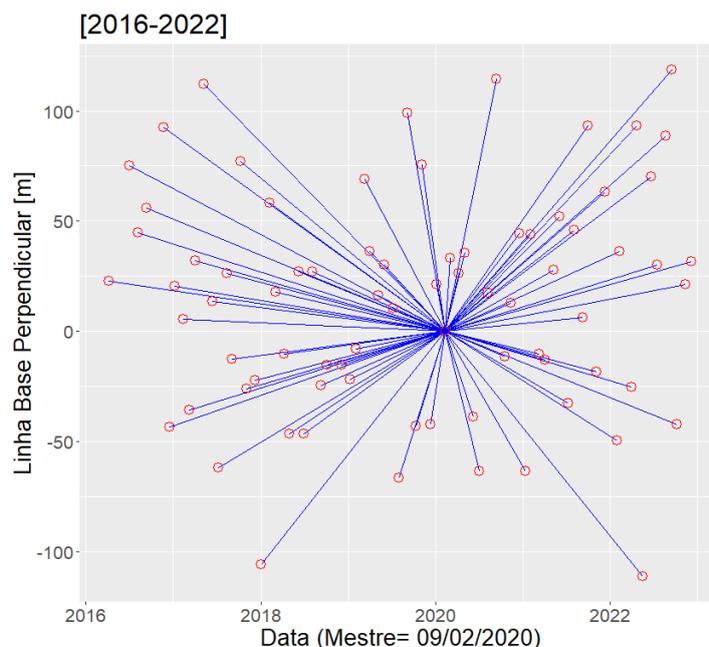
### 4.1 Processamento Interferométrico Empregando a Técnica PSInSAR

No processamento com a técnica PSInSAR, foram utilizadas imagens SAR provenientes do satélite Sentinel-1A da missão Sentinel-1. A missão Sentinel-1 consiste em uma constelação composta por dois satélites em órbita quase-polar (Sentinel-1A e 1B), que operam de forma contínua, adquirindo imagens SAR na banda C. Lançado em 2014, o Sentinel-1A foi seguido pelo Sentinel-1B em 2016, e ambos têm a capacidade de coletar dados em quatro modos distintos: *Stripmap (SM)*, *Interferometric Wide Swath (IW)*, *Extra Wide Swath (EW)* e *Wave (WV)*. No entanto, os produtos obtidos no modo IW são usados em processamentos interferométricos, os quais são adquiridos utilizando a técnica de observação do terreno com escaneamento progressivo, conhecida como *Terrain Observation with Progressive Scanning SAR (TOPSAR)* (DE ZAN e GUARNIERI, 2006). Isso gera uma faixa, sendo que cada faixa forma uma imagem IW. Cada imagem é composta por nove subfaixas, que, por sua vez, consistem em uma série de eclosões (*bursts*). O resultado final são imagens complexas *Single Look Complex (SLC)* que cobrem uma faixa de 250 km a uma resolução espacial de 5x20 m. Ressalta-se que os dados dos satélites Sentinel-1 são distribuídos pela ESA em três níveis de processamento: Nível-0, Nível-1 e Nível-2. Dados no Nível-0 são disponibilizados no formato bruto para uso específico, enquanto os produtos do Nível-1 são processados e disponibilizados como SLC. No Brasil, essas imagens são fornecidas apenas na geometria descendente de aquisição. Para obter informações mais detalhadas sobre as missões Sentinel, recomenda-se consultar ESA (2023).

O processamento, no entanto, envolveu o uso de dois pacotes de processamento: o *Sentinel Application Platform – SNAP* (ESA, 2022) e o *StaMPS* (HOOPER et al., 2010). Inicialmente, as imagens SAR foram pré-processadas no SNAP, uma plataforma desenvolvida pela *European Space Agency (ESA)* para o processamento e análise de dados dos satélites das missões Sentinel. Nessa etapa, as imagens passaram por uma série de procedimentos, incluindo a atualização das órbitas, a geocodificação e o processo de *debursting*, que determina os valores de alcance na área de sobreposição entre as faixas das imagens SAR, eliminando as linhas escuras formadas entre elas e resultando em uma imagem final contínua (MANDAL et al., 2019; IQBAL; ANGHEL; DATCU, 2022). Além disso, foi realizado o recorte da área de estudo e gerados os interferogramas que, posteriormente, foram utilizados na etapa de processamento empregando a técnica PSInSAR no ambiente do StaMPS, onde se identificaram os PS sobre a área de estudo. Para obter informações mais detalhadas sobre a integração do SNAP e do StaMPS, recomenda-se consultar os trabalhos de Fomelis et al. (2018), Grassi e Mancini (2019) e Alves, Krueger e Dalazoana (2023).

A Figura 5 apresenta a distribuição temporal e da linha base perpendicular das imagens S em relação à imagem M. Foram utilizadas 77 imagens SAR da missão Sentinel-1A, capturadas no modo descendente durante o período de 2016 a 2022. As imagens dos anos de 2020, 2021 e 2022 foram usadas para verificar o comportamento da área após o período investigado por Werlich (2017) e Amagua et al. (2022), que foi de 2014 a 2019. As imagens dos anos de 2014 e 2015 não foram consideradas, pois não havia imagens SAR do Sentinel-1 disponíveis nesse período sobre a área de estudo.

Figura 5 - Representação da Distribuição Temporal e da Linha base Perpendicular das Imagens S em Relação à Imagem M.



Fonte: Os autores (2023).

A seleção da imagem M foi baseada nas Eq. (1) e Eq. (2), onde a imagem adquirida no dia 09 de fevereiro de 2020 foi selecionada, procedimento este realizado dentro do ambiente da plataforma SNAP. A Tabela 5 apresenta algumas informações importantes sobre a imagem M selecionada do conjunto de imagens utilizadas nesse estudo. O ângulo de incidência médio foi obtido através do metadado da imagem M, que está referenciado ao sistema WGS84.

Tabela 5 - Características da Imagem Mestre. As imagens SAR podem ser acessadas gratuitamente através do portal Copernicus, disponível em <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Elas estão disponíveis em diferentes modalidades de polarização, que podem ser únicas ou duplas. No contexto da geração de interferogramas, recomenda-se o uso de uma única polarização, por exemplo, a polarização VV. Isso é aconselhado porque o uso de polarização única ajuda a reduzir o tempo de processamento e evita a geração de arquivos duplicados, o que pode corroborar no surgimento de erros nas etapas subsequentes do processamento.

Atributos	Valores
Ângulo Direção Azimutal do Satélite (graus decimais)	-167,4701
Data de Aquisição	09/02/2020
Missão	Sentinel - 1A
Produto	SLC
Polarização	VV
Banda	C
Modo	IW
Swath	IW3
Órbita	31173
Ângulo de Incidência Médio (graus decimais)	42,28433

Fonte: Os autores (2023).

Para remover a fase topográfica dos interferogramas, empregou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) da ALOS-PALSAR *Radiometric Terrain Correction* (RTC), acessado diretamente pelo portal do *Alaska Satellite Facility* (ASF) através do link <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Esse MDE foi gerado a partir dos dados altimétricos obtidos pelo sistema SAR do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), após passarem por correções geométricas e radiométricas realizadas pela ASF. O MDE original do SRTM apresenta, no Brasil, uma resolução de aproximadamente ~30 metros (ASF, 2023).

#### 4.2 Comparação dos Resultados dos Processamentos GPS e PSInSAR

O processamento GNSS fornece resultados com velocidades e coordenadas em um espaço

tridimensional (3D), enquanto a técnica PSInSAR oferece informações unidimensionais (1D) apenas na direção LoS. Quando se dispõe de dados coletados nas órbitas ascendente e descendente, é possível combiná-los para obter informações sobre a deformação nas direções horizontal e vertical. Isso é evidenciado nos estudos de Tang et al. (2009); Fiaschi et al. (2017); Dias, Catalao e Marques (2018); Blasco et al. (2019) Aslan et al. (2020); Luo et al. (2021) e Kumar, Dwivedi e Martha (2022). No entanto, é importante ressaltar que a missão Sentinel-1 disponibiliza dados apenas na direção descendente no Brasil.

Quando se tem informações sobre deslocamentos e velocidades tridimensionais nas direções norte (*north*), leste (*east*) e vertical (*up*), obtidas por meio de observações GNSS, por exemplo, é possível projetá-las na direção LoS, que é o sistema de referência do SAR. Com isso, a compatibilização dos sistemas de referência de velocidades e deslocamentos das duas técnicas, pode ser feita empregando a Eq. (4) (ARIKAN, HOOPER e HANSSEN, 2009; HASTAOGLU, 2016):

$$D_{LoS} = -\cos\alpha_h \sin\phi d_e + \sin\alpha_h \sin\phi d_n + \cos\phi d_{up} \tag{4}$$

com  $\phi$  o ângulo de incidência do radar no ponto de espalhamento,  $\alpha_h$  a direção azimutal do satélite e  $d$  o deslocamento superficial. Essas informações são obtidas no cabeçalho da imagem M usada no processamento com a técnica PSInSAR, as quais estão dispostas na Tabela 5.

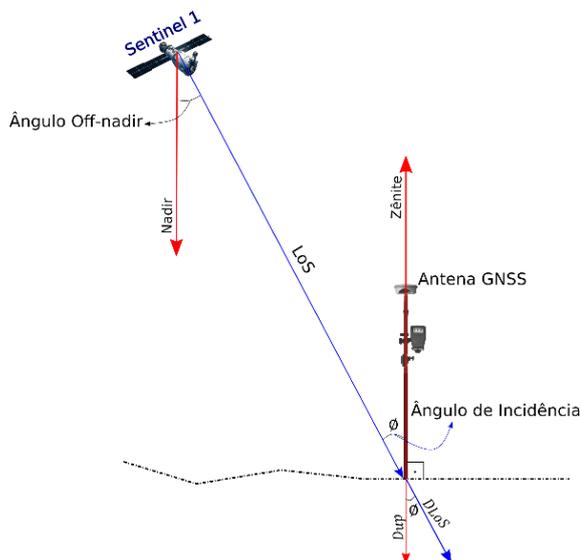
Outra maneira de compatibilizar as velocidades obtidas pelas técnicas PSInSAR e GNSS, é utilizar apenas as velocidades e/ou coordenada vertical (*up*) (Figura 6). Nesse caso, as coordenadas horizontais são desconsideradas e a Eq. (4) fica reduzida conforme apresentado na Eq. (5).

$$D_{LoS} = \cos\phi d_{up} \tag{5}$$

Desse modo, foram realizadas duas análises comparativas: na primeira análise, as velocidades GPS obtidas por Amagua et al. (2022) foram projetadas na LoS e comparadas com as velocidades calculadas pela técnica PSInSAR; na segunda análise, com o objetivo de validar os resultados do processamento com a técnica PSInSAR, as séries temporais obtidas com a PSInSAR foram comparadas com a série gerada pelas observações GNSS da estação de referência utilizada no processamento de Amagua et al. (2022), a estação UFPR da RBMC (RBMC - UFPR).

Para esse propósito, foram selecionados os pontos de referência PS mais próximos da estação RBMC-UFPR. É importante salientar que a série temporal dessa estação foi gerada utilizando os dados GNSS, que foram processados pelo método PPP e disponibilizados gratuitamente pelo *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL), e estão referenciados ao sistema WGS84 (BLEWITT et al., 2018). As coordenadas da estação RBMC-UFPR, no sistema local (*north, east, up*), foram utilizadas para esse processo comparativo. Para mais informações sobre esses dados, consulte <http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations/UFPR.sta>.

Figura 6 - Representação da Projeção da Velocidade em LoS.



Fonte: Os autores (2023).

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

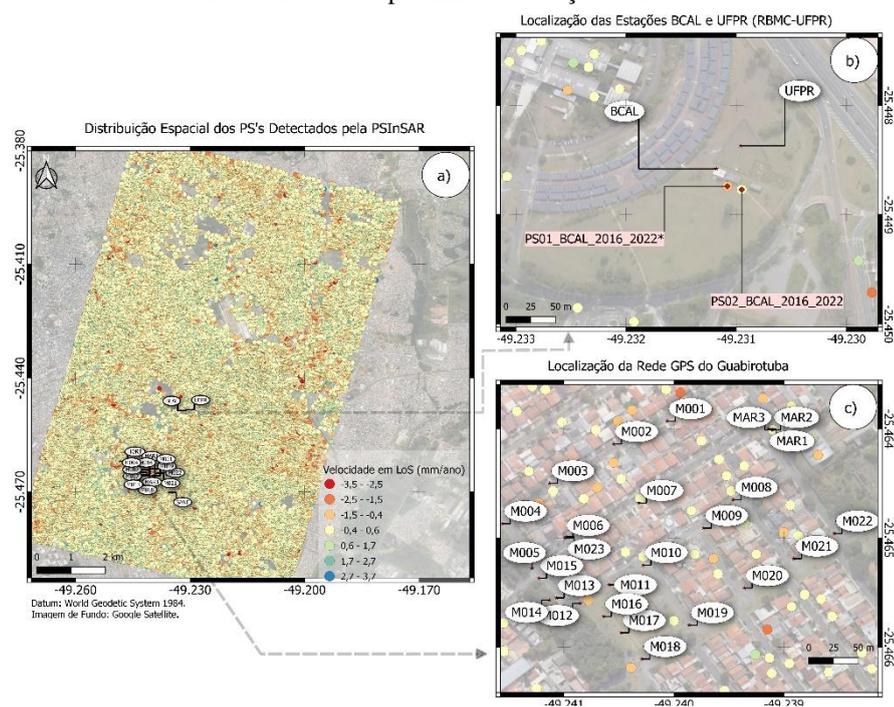
- i. Selecionou-se as coordenadas locais na mesma data de aquisição das imagens S;
- ii. Projetou-se estas coordenadas na LoS (Eq. 4 e Eq. 5), usando o ângulo de incidência médio dentro da rede GPS do Guabirota e o ângulo zenital da imagem M (Tabela 5);
- iii. Determinou-se as alturas relativas das coordenadas do GPS em LoS, que foram obtidas por meio da diferença entre as coordenadas projetadas e a coordenada da estação do mesmo dia da aquisição da imagem M;
- iv. Retirou-se a tendência das séries e, por fim;
- v. Plotou-se as séries temporais e calculou-se o coeficiente de correlação entre elas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Processamento PSInSAR

A técnica PSInSAR identificou um total de 42173 PS em uma área de 102,425 km<sup>2</sup>, resultando em uma densidade de 412 PS/km<sup>2</sup>. Esses PS exibiram velocidades mínimas e máximas de -3,538 mm/ano e 3,374 mm/ano, respectivamente, com um desvio padrão médio de ±0,457 mm/ano. A distribuição dos PS pode ser visualizada na Figura 7a, indicando que a maioria deles foi detectada em áreas de construções ou solos expostos. Isso ocorre porque a técnica PSInSAR seleciona *pixels* que mantiveram uma baixa decorrelação espacial e temporal, ou seja, objetos que não sofreram mudanças significativas em sua posição durante o período de 2016 a 2022. Além disso, é importante destacar que as imagens SAR foram adquiridas usando a banda-C do sistema Sentinel-1, com um comprimento de onda de aproximadamente 4,5 centímetros, o que impõe limitações na detecção de PS com velocidades elevadas. Isso ocorre porque a capacidade de identificar movimentos se limita a um quarto do comprimento de onda entre duas aquisições sucessivas de dois PS próximos no mesmo conjunto de dados. Outro ponto relevante é a resolução da imagem SAR, que é de 5x20m; contudo, o uso de imagens com resolução espacial mais alta teria o potencial de melhorar a distinção de objetos e, assim, aumentar o número de PS detectados na área de estudo.

Figura 7 - Distribuição dos PS Identificados pela Técnica PSInSAR no período de 2016 a 2022. Onde (a) apresenta a distribuição espacial dos PS detectados pela técnica PSInSAR; (b) destaca dois PS próximos à estação BCAL e RBMC-UFPR, que ficam uma distância média de 30m; (c) exhibe a rede GPS do bairro do Guabirota e a distribuição espacial dos PS identificados próximos às estações GPS.



Fonte: Os autores (2023).

Cerca de 50 PS foram detectados próximo à rede do Guabirotuba (Figura 7c), com velocidades médias variando de -2,5 a 0,6 mm/ano. No entanto, nem todas as estações possuíam PS próximos, o que levou à seleção apenas das estações com PS localizados a uma distância máxima de 20 metros (para evitar utilizar PS próximo a uma outra estação). As velocidades GPS apresentadas na Tabela 6 foram obtidas a partir do processamento realizado por Amagua et al. (2022) e são relativas à estação RBMC-UFPR. Observa-se que o PS mais próximo à estação BCAL (~30 m de distância), o PS01\_BCAL\_2016\_2022\*, apresentou uma velocidade na LoS de -0,47 mm/ano com a técnica PSInSAR, enquanto registrou velocidades de 1,376 mm/ano e 1,406 mm/ano usando as projeções 3D e 1D, respectivamente, conforme as Eq. (4) e Eq. (5). No geral, as velocidades obtidas com a técnica PSInSAR ou projeções 3D/1D foram classificadas como extremamente lentas (vide Tabela 2), exceto para a estação M018, que apresentou uma velocidade de -32,218 mm/ano usando a projeção 3D, mas com grande influência da coordenada norte; no entanto, ao utilizar apenas a coordenada vertical, a velocidade foi de -6,607 mm/ano, contra velocidade de -0,63 mm/ano obtida pela técnica PSInSAR. É importante destacar que a velocidade atribuída à estação M018 no estudo realizado por Amagua et al. (2022) é uma velocidade pontual, o que significa que ela se refere apenas à posição exata em que a estação está localizada. Conforme o mesmo autor explicou, essa velocidade é uma consequência do movimento pontual do marco que materializa a estação e não reflete o movimento da área em que ela se encontra. Em contrapartida, a velocidade do PS representa a velocidade da região em que ele está localizado, ou seja, ele considera o movimento de uma área mais ampla e, nesse caso, não corresponde à velocidade pontual da estação M018.

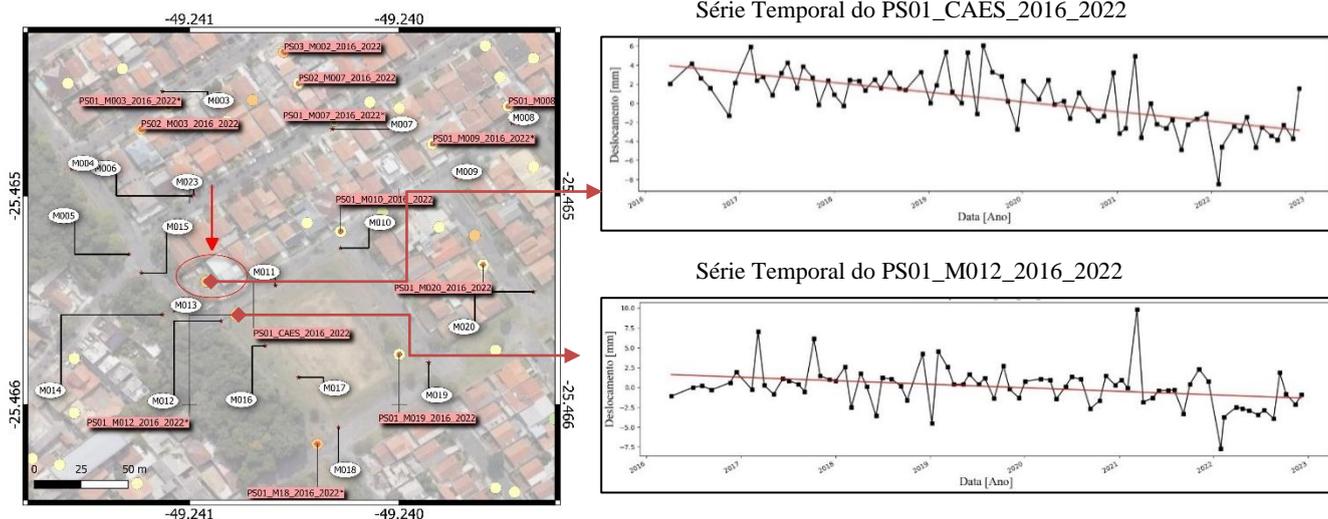
Tabela 6 - Velocidades Relativas das Estações da Rede Guabirotuba.

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

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

A Figura 8 apresenta a localização da construção afetada pelo processo de subsidência descrito na Figura 4. Nesta área dois PS foram identificados: o PS01\_CAES\_2016\_2022, indicado pela seta vermelha, e o PS01\_M012\_2016\_2022, próximo à estação M012. Os resultados indicam que o primeiro ponto apresentou uma taxa de deslocamento de -1,03 mm/ano, enquanto o segundo exibiu um processo extremamente lento, com velocidade de -0,45 mm/ano. A estação M012 também foi avaliada utilizando projeções em LoS, que detectaram velocidades de -10,904 mm/ano e -3,026 mm/ano, respectivamente, para as projeções 3D e 1D. No geral, a velocidade foi classificada como extremamente lenta, conforme indicado na Tabela 2.

Figura 8 - Série Temporal dos PS próximos ao Marco M012. O mapa a esquerda apresenta a localização de alguns PS em relação aos marcos da Rede GPS do Guabirota. Os gráficos à direita exibem as séries temporais de dois PS identificados próximos à construção que apresentou rachaduras na sua estrutura (vide Figura 4).

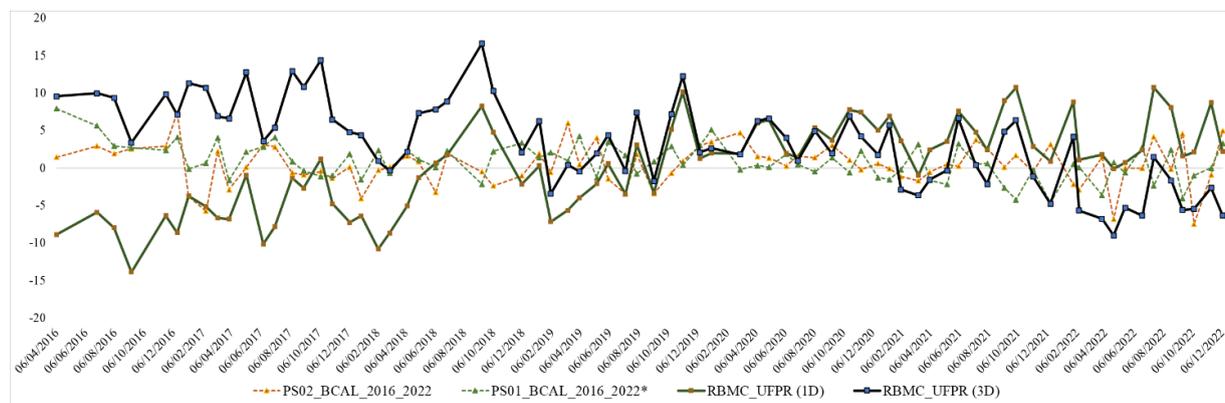


Fonte: Os autores (2023).

### 5.2 Comparação entre as Séries Temporais da Estação RBMC-UFPR e PS vizinhos

Nessa etapa foi realizado uma comparação entre as séries temporais da estação RBMC-UFPR e os PS mais próximos detectados pela técnica PSInSAR. Para essa comparação, foram considerados os PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, conforme mostrado na Figura 7b, sendo que o PS01\_BCAL\_2016\_2022\* está mais próximo da estação UFPR. Nesse sentido, utilizou-se a data da imagem M como referência (09/02/2020), calculou-se o deslocamento das coordenadas (*north, east, up*) da estação RBMC-UFPR e, em seguida, gerou-se as séries temporais. A Figura 9 apresenta as séries temporais dos PS01\_BCAL\_2016\_2022\*, PS02\_BCAL\_2016\_2022 e das coordenadas local da estação RBMC-UFPR projetadas em LoS.

Figura 9 - Série Temporal dos PS e da Estação RBMC-UFPR

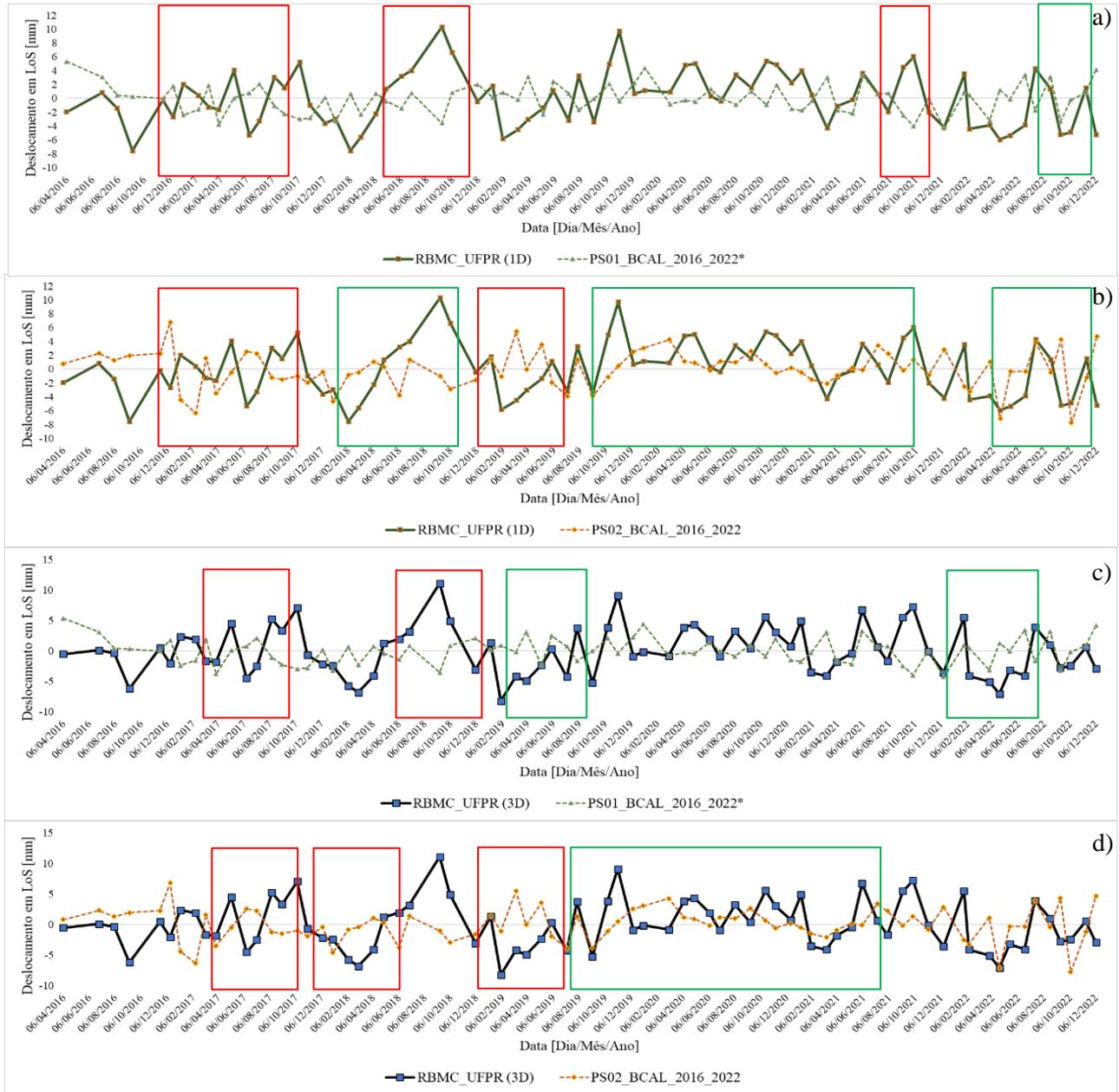


Fonte: Os autores (2023).

Através da análise da Figura 9, é possível observar uma tendência crescente ou decrescente tanto nas séries temporais dos PS quanto na série temporal da estação RBMC-UFPR. Com o intuito de torná-las comparáveis, removeu-se a tendência de cada série, resultando nas séries temporais apresentadas na Figura 10. Ao analisar a Figura 10a, é possível notar que a série temporal gerada pelo PS01\_BCAL\_2016\_2022\* apresentou, em alguns momentos, um comportamento oposto ao da série gerada pela coordenada *up* na LoS da estação RBMC-UFPR (1D). Esse comportamento de inversão pode ser observado nas demais séries, como evidenciado pelos retângulos vermelhos. Na Figura 10b, que compara as séries PS01\_BCAL\_2016\_2022 e RBMC-UFPR (1D), também ocorreram problemas semelhantes aos identificados na Figura 10a, enquanto em outros momentos, como indicado pelo retângulo verde, elas apresentaram comportamentos semelhantes.

Equitativamente, ao comparar a série da RBMC-UFPR (3D) com as séries do PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, foram identificados os mesmos problemas detectados nas séries apresentadas nas Figura 10a e 10b. Isso implica que, nesse caso específico, após remover a tendência das séries, as projeções das coordenadas (*north, east, up*) na LoS utilizando a projeção 3D ou 1D produziram resultados semelhantes.

Figura 10 - Série Temporal dos PS e da Estação RBMC-UFPR sem Tendência. Sendo (a) e (b) apresentam as séries temporais da estação RBMC-UFPR(1D) usando a Eq. (5) com os PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, respectivamente; (c) e (d) exibem as séries temporais da estação RBMC-UFPR(3D), empregando a Eq. (4), com os PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, respectivamente. Os retângulos em verde e vermelho exemplificam pontos das séries onde ocorreu convergência e divergência.



Fonte: Os autores (2023).

Através da Figura 10, é possível observar que as duas séries geradas pelas técnicas utilizadas apresentaram, em alguns momentos, comportamentos semelhantes, mas em outros momentos, houve divergência. É importante salientar que o processo de compatibilização dos deslocamentos envolveu o uso do ângulo de incidência médio do terreno e o ângulo azimutal do satélite na época de aquisição da imagem M, ao invés de informações específicas da própria imagem S. Além disso, os PS e a estação RBMC-UFPR não são homólogos, ou seja, estão espacialmente afastados. Os PS selecionados representam o movimento do prédio (BCAL, veja a Figura 7c) e não da estação em questão. Devido a esses fatores, não seria realista esperar que os comportamentos das duas séries fossem totalmente equivalentes. No entanto, a análise comportamental da

dinâmica da área de estudo foi possível. É importante destacar que a técnica utilizada oferece informações valiosas, mas é necessário levar em consideração as limitações e fontes de erro envolvidas.

Os valores da Tabela 7 representam a correlação de Pearson entre pares de variáveis. Os valores variam de -1 a 1, onde -1 indica uma correlação negativa perfeita (ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui em perfeita proporção), 0 indica ausência de correlação linear e 1 indica uma correlação positiva perfeita (ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta em perfeita proporção). Nesse sentido, verificou-se que as variáveis RBMC\_UFPR (1D) e RBMC\_UFPR (3D) possuem uma forte correlação positiva (0,982), o que indica que elas se movem juntas na mesma direção. Já as variáveis PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022 possuem uma correlação positiva moderada (0,739), indicando que elas também se movem juntas, mas em menor intensidade. Além disso, observa-se uma correlação negativa moderada entre as variáveis RBMC\_UFPR (1D) e PS01\_BCAL\_2016\_2022, e entre as variáveis RBMC\_UFPR (3D) e PS01\_BCAL\_2016\_2022\* e PS02\_BCAL\_2016\_2022, indicando que quando uma dessas variáveis aumenta, as outras diminuem em intensidade moderada.

Tabela 7 - Matriz de Correlação entre as Séries Temporais.

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

Fonte: Os autores (2023).

## 6 CONCLUSÕES

Este manuscrito destaca a complementaridade das técnicas GNSS e PSInSAR no monitoramento da subsidência do terreno. Enquanto o GNSS oferece alta precisão e monitoramento contínuo, a técnica PSInSAR pode fornecer informações adicionais por meio do processamento de imagens SAR com uma abordagem multi-temporal. No entanto, é importante lembrar que as duas técnicas operam de maneiras diferentes e detectam mudanças em direções diferentes, exigindo um processo de compatibilização matemática. Além disso, a comparação entre as duas técnicas revelou algumas divergências nos resultados, ressaltando a importância de considerar cuidadosamente as limitações e o contexto de cada técnica.

Ao analisar a rede GPS do Guabirota, observou-se que as estações apresentaram uma velocidade extremamente baixa quando projetadas em LoS. A projeção na LoS dos deslocamentos relativos das coordenadas (*north, east, up*) e das velocidades apresentaram comportamentos semelhantes e divergentes em alguns pontos quando comparados aos resultados obtidos com a técnica PSInSAR. Embora ambas as técnicas consigam detectar tendências em uma série de observações de deslocamentos, a PSInSAR e a estação RBMC-UFPR apresentaram baixa correlação nos deslocamentos em LoS. No entanto, é possível realizar uma análise completa do terreno em questão, considerando que são dois sistemas diferentes na obtenção desses deslocamentos e que os pontos de suas localizações não são homólogos no terreno.

No geral, este manuscrito teve como objetivo estabelecer uma análise comparativa entre os resultados obtidos por duas técnicas diferentes: o uso de observáveis do GNSS (mais especificamente do GPS) e imagens SAR do Sentinel-1A (usando a técnica PSInSAR). Inicialmente, as velocidades calculadas por essas duas técnicas foram comparadas. Em seguida, foram comparados os deslocamentos relativos na técnica PSInSAR em relação à imagem M e no GNSS, usando a estação RBMC-UFPR e a coordenada obtida no mesmo dia da imagem M. A escolha desta estação como referência foi justificada pelo fato de ter sido utilizada como referência durante o processamento relativo das estações da rede GPS do Guabirota, que gerou as velocidades tridimensionais das estações, e por ter informações de coordenadas processadas disponíveis na mesma data em que as imagens S foram obtidas. As coordenadas (*north, east, up*) do NGL foram usadas porque estão disponíveis gratuitamente para o usuário. Por fim, a análise dos deslocamentos relativos das séries temporais GPS e PInSAR é exclusiva. De uma forma simples e eficiente, foi possível fazer uma análise importante nos resultados obtidos por essas duas técnicas.

Este manuscrito destaca a importância de combinar diferentes técnicas para obter uma visão mais

abrangente e precisa do comportamento do terreno em relação à subsidência. Ressalta-se que uma técnica não substitui a outra, e sim, elas podem ser utilizadas como ferramentas complementares, em que uma fornece resolução espacial e a outra, resolução temporal. Futuros estudos devem se concentrar em entender melhor as razões pelas quais as séries temporais dos deslocamentos relativos gerados pelas duas técnicas apresentaram divergências em certos pontos.

### Agradecimentos

O primeiro autor agradece à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), - 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 R.D., C.P.K. e L.P. realizaram as revisões iniciais.

### Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

### REFERÊNCIAS

- ABIDIN, H. Z.; DJAJA, R.; DARMAWAN, D.; HADI, S.; AKBAR, A.; RAJIYOWIRYONO, H.; SUDIBYO, Y.; MEILANO, I.; KASUMA, M.A.; KAHAR, J.; SUBARYA, C.. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its geodetic monitoring system. **Natural Hazards**, v. 23, n. 2–3, p. 365–387, 2001.
- ALATZA, S.; PAPOUTSIS, I.; PARADISSIS, D.; KONTOES, C.; PAPADOPOULOS, G. A. Multi-temporal inSAR analysis for monitoring ground deformation in Amorgos Island, Greece. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 2, p. 1–15, 2020. DOI: 10.3390/s20020338.
- ALVES, S. DA C.; KRUEGER, C. P.; DALAZOANA, R. Técnica PSInSAR na Avaliação de Deslocamentos: Análise Conceitual, Aplicações e Perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 75, n. 1986, p. 1–24, 2023. DOI: 10.14393/rbcv75n0a-66102.
- AMAGUA, C. G. P.; EURIQUES, J. F.; ALVES, S. DA C.; KRUEGER, C. P. Analysis of local surface displacement using repeated GPS measurements: a case study of the Guabirota area, Curitiba, Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 28, n. 1, p. 0–3, 2022. DOI: 10.1590/s1982-21702022000100005.
- ANDREAS, H.; ZAINAL ABIDIN, H.; GUMILAR, I.; SIDIQ, T.; SARSIT, D. On the acceleration of land subsidence rate in Semarang City as detected from GPS surveys. **E3S Web of Conferences**, v. 94, 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/20199404002.
- ARIKAN, M.; HOOPER, A.; HANSEN, R. Radar Time Series Analysis Over West Anatolia. **Fringe 2009**, p. 1–6, 2009.
- ASF. **PALSAR RTC DEM Information**. 2023. Disponível em: < <https://asf.alaska.edu/information/palsar-rtc-dem-information/>>. Acesso em: 21 de nov de 2023.
- ASLAN, G.; FOUMELIS, M.; RAUCOULES, D.; DE MICHELE, M.; BERNADIE, S.; CAKIR, Z. Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) technique in the French alps. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, 2020. DOI: 10.3390/rs12081305.
- 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. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- BLANCO-SÁNCHEZ, P.; MALLORQUÍ, J. J.; DUQUE, S.; MONELLS, D. The coherent pixels technique

- (CPT): An advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring. **Pure and Applied Geophysics**, v. 165, n. 6, p. 1167–1193, 2008. DOI: 10.1007/s00024-008-0352-6.
- 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, p. 1–17, 2019. DOI: 10.3390/rs11020129.
- BRAMANTO, B.; GUMILAR, I.; SIDIQ, T. P.; RAHMAWAN, Y. A.; ABIDIN, H. Z. Geodetic evidence of land subsidence in Cirebon, Indonesia. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 30, n. October 2022, p. 100933, 2023. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.100933.
- CARLÀ, T.; FARINA, P.; INTRIERI, E.; KETIZMEN, H.; CASAGLI, N. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. **Engineering Geology**, v. 235, n. January, p. 39–52, 2018. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.01.021.
- CENNI, N.; FIASCHI, S.; FABRIS, M. Monitoring of land subsidence in the river delta (Northern Italy) using geodetic networks. **Remote Sensing**, v. 13, n. 8, 2021. DOI: 10.3390/rs13081488.
- CHEN, Y.; REMY, D.; FROGER, J. L.; PELTIER, A.; VILLENEUVE, N.; DARROZES, J.; PERFETTINI, H.; BONVALOT, S. Long-term ground displacement observations using InSAR and GNSS at Piton de la Fournaise volcano between 2009 and 2014. **Remote Sensing of Environment**, v. 194, 2017, p. 230–247, 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.038.
- CHOUDHURY, P.; GAHALAUT, K.; DUMKA, R.; GAHALAUT, V.K.; SINGH, A.K.; KUMAR, S. GPS measurement of land subsidence in Gandhinagar, Gujarat (Western India), due to groundwater depletion. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 22, p. 1–5, 2018. DOI: 10.1007/s12665-018-7966-5.
- 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. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00195-3.
- 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. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
- CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; IGLESIAS, R.; CRIPPA, B. Persistent Scatterer Interferometry: Potential, limits and initial C- and X-band comparison. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 76, n. 9, p. 1061–1069, 2010. DOI: 10.14358/PERS.76.9.1061.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. In: A. K. Turner; R. L. Schuster (Orgs.); **Landslides Investigation and Mitigation (Special Report 247)**. p.36–75, 1996.
- CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic aperture Radar Systems and Signal Processing**. New York, 1991.
- CZIKHARDT, R.; PAPCO, J.; BAKON, M.; LISCAK, P.; ONDREJKA, P.; ZLOCHA, M.. Ground stability monitoring of undermined and landslide prone areas by means of sentinel-1 multi-temporal InSAR, case study from Slovakia. **Geosciences (Switzerland)**, v. 7, n. 3, p. 1–17, 2017. DOI:10.3390/geosciences7030087.
- DECLERCQ, P.-Y.; DUSAR, M.; PIRARD, E.; VERBEURGT, J.; CHOOPANI, A.; DEVLEESCHOUWER, X. . Post Mining Ground Deformations Transition Related to Coal Mines Closure in the Campine Coal Basin, Belgium, Evidenced by Three Decades of MT-InSAR Data. **Remote Sensing**, v. 15, n. 3, p. 725, 2023. DOI: 10.3390/rs15030725
- DIAS, P.; CATALAO, J.; MARQUES, F. O. Sentinel-1 InSAR data applied to surface deformation in Macaronesia (Canaries and Cape Verde). *Procedia Computer Science*. **Anais...** v. 138, p.382–387, 2018. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.054.
- DING, L.; LI, C.; WEI, L.; GUO, Z.; JIA, P.; WANG, W.; GAO, Y.. Slope Deformation Prediction Based on MT-InSAR and Fbprophet for Deep Excavation Section of South–North Water Transfer Project. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 17, 2022. DOI: 10.3390/su141710873
- DROZ, P.; FUMAGALLI, A.; NOVALI, F.; YOUNG, B. GPS and Insar Technologies: a Joint Approach for

- the Safety of Lake Sarez. **Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management**, , n. Component C, p. 20–24, 2008.
- DU, Z. **Mapping Earth Surface Deformation using New Time Series Satellite Radar Interferometry**, 2017. 226 p. Thesis. Geoscience and Earth Observing Systems Group. The University of New South Wales. Sydney, 2017.
- DUMKA, R. K.; SURIBABU, D.; NARAIN, P.; KOTHYARI, G.; TALOOR, A. K.; PRAJAPATI, S. PSInSAR and GNSS derived deformation study in the west part of Narmada Son Lineament (NSL), western India. **Quaternary Science Advances**, v. 4, p. 100035, 2021. DOI: 10.1016/j.qsa.2021.100035.
- ESA. **The Sentinel-1 Toolbox**. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>>. Acesso em: 21 out. 2022.
- ESA. **Sentinel Overview**. Disponível em: <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>>. Acesso em: 18 out. 2023.
- FAROLFI, G.; DEL SOLDATO, M.; BIANCHINI, S.; CASAGLI, N. A procedure to use GNSS data to calibrate satellite PSI data for the study of subsidence: an example from the north-western Adriatic coast (Italy). **European Journal of Remote Sensing**, v. 52, n. sup4, p. 54–63, 2019. DOI: 10.1080/22797254.2019.1663710.
- FELIPE, S. Características Geológico Geotécnicas na Formação Guabirotuba Curitiba. **MINEROPAR - Serviço Geológico do Paraná**, v. 1ª Edição, n. CDU: 624.13, p. 48, 2011.
- FERRETTI, A.; FUMAGALLI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; RUCCI, A. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3460–3470, 2011. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465.
- 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. DOI: 10.1109/36.868878.
- 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. DOI: 10.1109/36.898661.
- FIASCHI, S.; MANTOVANI, M.; FRIGERIO, S.; PASUTO, A.; FLORIS, M. Testing the potential of Sentinel-1A TOPS interferometry for the detection and monitoring of landslides at local scale (Veneto Region, Italy). **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 14, p. 1–13, 2017. DOI: 10.1007/s12665-017-6827-y.
- FOUMELIS, M.; BLASCO, J. M. D.; DESNOS, Y. L.; ENGD AHL, M.; FERNÁNDEZ, D.; VECI, L.; LU, J.; WONG, C. ESA SNAP - Stamps integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 2018-July, n. 1, p. 1364–1367, 2018. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519545.
- FRANGIONI, S. **Applications of SAR Interferometry for Monitoring Ground Deformations and Engineering Infrastructure**, 2014. Thesis. Dottorato Di Ricerca in Scienze della Terra. Università Degli Studi Firenze. Parc Mediterrani de la Tecnologia.2014.
- GEOTURISMOBRASIL. **Geologia de Curitiba**, , 2020. Curitiba. Disponível em: <[http://www.geoturismobrasil.com/Material didatico/Geologia de Curitiba.pdf](http://www.geoturismobrasil.com/Material%20didatico/Geologia%20de%20Curitiba.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- GRASSI, F.; MANCINI, F. Sentinel-1 data for ground deformation monitoring: the SNAP-StaMPS workflow. **Dief**, , n. July 2019, p. 20–25, 2019.
- GUO, J.; HU, J.; LI, B.; ZHOU, L.; WANG, W. Land subsidence in Tianjin for 2015 to 2016 revealed by the analysis of Sentinel-1A with SBAS-InSAR. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 026024, 2017. DOI: 10.1117/1.jrs.11.026024.
- GUO, L.; GONG, H.; LI, J.; ZHU, L.; XUE, A.; LIAO, L.; SUN, Y.; LI, Y.; ZHANG, Z.; GAO, M.; ZHAO, C.; CHENG, R.; ZHOU, J. Understanding Uneven Land Subsidence in Beijing, China, Using a Novel

- Combination of Geophysical Prospecting and InSAR. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 16, p. 1–11, 2020. DOI: 10.1029/2020GL088676.
- HANSEN, R. F. **Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis**. 1<sup>o</sup> ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.
- HANSEN, R. F. Satellite radar interferometry for deformation monitoring: A priori assessment of feasibility and accuracy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 6, n. 3–4, p. 253–260, 2005. DOI: 10.1016/j.jag.2004.10.004.
- HASTAOGLU, K. O. Comparing the results of PSInSAR and GNSS on slow motion landslides, Koyulhisar, Turkey. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 7, n. 2, p. 786–803, 2016. DOI: 10.1080/19475705.2014.978822.
- HERNDON, K.; MEYER, F.; FLORES, A.; CHERRINGTON, E.; KUCERA, L. **What is Synthetic Aperture Radar?** Disponível em: <<https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>>. Acesso em: 18 out. 2023.
- HERRING, T. A.; KING, R. W.; FLOYD, M. A.; MCCLUSKY, S. C. **GAMIT Reference Manual Release 10.7**. Massachusetts Institute of Technological, Cambridge, Massachusetts. , n. June, p. 1–168, 2018.
- HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The landslide Handbook - A guide to understanding landslides. **US Geological Survey Circular**, , n. 1325, p. 1–147, 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. DOI: 10.1029/2006JB004763.
- HOOPER, A.; SPAANS, K.; BEKAERT, D.; CUENCA, C.M.; ARIKAN, M.; OYEN, A. **StaMPS/MTI Manual**. , p. 1–35, 2010.
- HU, B.; CHEN, J.; ZHANG, X. Monitoring the land subsidence area in a coastal urban area with InSAR and GNSS. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 14, p. 1–19, 2019. DOI: 10.3390/s19143181.
- HU, X.; LU, Z.; PIERSON, T. C.; KRAMER, R.; GEORGE, D. L. Combining InSAR and GPS to Determine Transient Movement and Thickness of a Seasonally Active Low-Gradient Translational Landslide. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 3, p. 1453–1462, 2018. DOI: 10.1002/2017GL076623.
- IAT. **Mapeamento Geológico - MINEROPAR**. Disponível em: <<http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapeamento-Geologico>>. Acesso em: 21/10/2021.
- IBGE. IBGE Cidades - Curitiba. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/curitiba/panorama>>. Acesso em: 19/10/2021.
- IQBAL, M. A.; ANGHEL, A.; DATCU, M. On the De-Ramping of SLC-IW Tops SAR Data and Ocean Circulation Parameters Estimation. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 2022-July, p. 6817–6820, 2022. DOI:10.1109/IGARSS46834.2022.9884331.
- KOMAC, M.; HOLLEY, R.; MAHAPATRA, P.; VAN DER MAREL, H.; BAVEC, M. Coupling of GPS/GNSS and radar interferometric data for a 3D surface displacement monitoring of landslides. **Landslides**, v. 12, n. 2, p. 241–257, 2015. DOI: 10.1007/s10346-014-0482-0.
- KUMAR MAURYA, V.; DWIVEDI, R.; RANJAN MARTHA, T. Site scale landslide deformation and strain analysis using MT-InSAR and GNSS approach – A case study. **Advances in Space Research**, v. 70, n. 12, p. 3932–3947, 2022. DOI: 10.1016/j.asr.2022.05.028.
- LI, C.; FERNANDEZ-STEEGER, T. M.; LINK, J. Á. B.; MAY, M.; AZZAM, R. Use of mems accelerometers/inclinometers as a geotechnical monitoring method for ground subsidence. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 11, n. 4, p. 337–349, 2014. DOI: 10.13168/AGG.2014.0015.
- DE LIMA, F. M.; FERNANDES, L. A.; DE MELO, M. S.; GÓES, A. M.; MACHADO, D. A. M. Faciologia e contexto deposicional da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba (PR). **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 1, p. 168–184, 2013. DOI: 10.5327/Z2317-48892013000100014.
- LIU, G.; LUO, X.; CHEN, Q.; HUANG, D.; DING, X. Detecting land subsidence in Shanghai by PS-networking SAR interferometry. **Sensors**, v. 8, n. 8, p. 4725–4741, 2008.

- LIU, H.; HUANG, S.; XIE, C.; TIAN, B.; CHEN, M.; CHANG, Z. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai–Tibet Railway by MT-InSAR Technology. **Land**, v. 12, n. 2, p. 474, 2023. DOI: 10.3390/land12020474.
- LU, L.; FAN, H.; LIU, JIE; LIU, JIULI; YIN, J. Time series mining subsidence monitoring with temporarily coherent points interferometry synthetic aperture radar: a case study in Peixian, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 15, p. 1–17, 2019. DOI: 10.1007/s12665-019-8475-x.
- DE LUNA, R. M. R.; DOS ANJOS GARNÉS, S. J.; DA SILVA PEREIRA CABRAL, J. J.; DOS SANTOS, S. M. Suitability of GNSS for analysis of soil subsidence in Recife in a highly urbanized coastal area. **Natural Hazards**, v. 106, n. 3, p. 1821–1837, 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-04513-2.
- LUO, Q.; LI, J.; ZHANG, Y. Monitoring Subsidence over the Planned Jakarta–Bandung (Indonesia) High-Speed Railway Using Sentinel-1 Multi-Temporal InSAR Data. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, 2022. DOI: 10.3390/rs14174138.
- LUO, S.; FENG, G.; XIONG, Z.; WANG, H.; ZHAO, Y.; LI, K.; DENG, K.; WANG, Y.. An improved method for automatic identification and assessment of potential geohazards based on mt-insar measurements. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, 2021. DOI: 10.3390/rs13173490.
- MANDAL, D.; VAKA, D. S.; BHOGAPURAPU, N. R.; VANMA, V.S. K.; KUMAR, V.; RAO, Y.S.; BHATTACHARYA, A.. Sentinel-1 SLC preprocessing workflow for polarimetric applications: A generic practice for generating dual-pol covariance matrix elements in SNAP S-1 Toolbox. **Preprints**, , n. November, p. 2019110393, 2019. DOI: 10.20944/preprints201911.0393.v1.
- MANTOVANI, M.; BOSSI, G.; DYKES, A. P.; PASUTO, A.; SOLDATI, M.; DEVOTO, S.. Coupling long-term GNSS monitoring and numerical modelling of lateral spreading for hazard assessment purposes. **Engineering Geology**, v. 296, n. September 2021, p. 106466, 2022. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106466.
- MEDHAT, N. I.; YAMAMOTO, M. Y.; ICHIHASHI, Y. Inclinator and Improved SBAS Methods with a Random Forest for Monitoring Landslides and Anchor Degradation in Otoyo Town, Japan. **Remote Sensing**, v. 15, n. 2, p. 1–18, 2023. DOI: 10.3390/rs15020441.
- MINEROPAR. **Atlas Comentado da Geologia e do Recursos Minerais do Estado do Paraná**. Curitiba, 2001.
- MOREIRA, A.; PRATS-IRAOLA, P.; YOUNIS, M.; KRIEGER, G.; HAJNSEK, I.; PAPATHANASSIOU, K.P.. A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 1, n. 1, p. 6–43, 2013. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
- OPENSTREETMAP. **OpenStreetMap**. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/>>. Acesso em: 25 out. 2021.
- PARIZZI, A.; GONZALEZ, F. R.; BRCIC, R. A covariance-based approach to merging InSAR and GNSS displacement rate measurements. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2, 2020. DOI: 10.3390/rs12020300.
- PELTIER, A.; BIANCHI, M.; KAMINSKI, E.; KOMOROWSKI, C.; RUCCI, A.; STAUDACHER, T. PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de La Fournaise. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 12, p. 1–5, 2010. DOI: 10.1029/2010GL043846
- PERISSIN, D.; WANG, Z.; WANG, T. The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. **34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring**, 2011.
- PEZZO, G.; PALANO, M.; BECCARO, L.; TOLOMEU, C.; ALBANO, M.; ATZORI, S.; CHIARABBA, C.. Coupling Flank Collapse and Magma Dynamics on Stratovolcanoes: The Mt. Etna Example from InSAR and GNSS Observations. **Remote Sensing**, v. 15, n. 3, 2023. DOI: 10.3390/rs15030847.
- QU, F.; LU, Z.; ZHANG, Q.; BAWDEN, G. W.; KIM, J-W.; ZHAO, C.; QU, W. Mapping ground deformation over Houston-Galveston, Texas using multi-temporal InSAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 169, p. 290–306, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.027.
- ROQUE, D.; SIMONETTO, E.; FALCÃO, A. P.; PERISSIN, D.; DURAND, F.; MOREL, L.; FONSECA,

- A.M.; POLIDORI, L. An analysis of displacement measurements for Lisbon, Portugal, using combined InSAR and GNSS data. **European Space Agency, (Special Publication) ESA SP**, v. SP-740, n. 1, 2016.
- ROSA FILHO, E. F. DA; HINDI, E. C.; LUCENA, L. R. F. DE. Os Aquíferos Que Contribuem No Abastecimento Da Cidade De Curitiba-Paraná. **Águas Subterrâneas**, v. 16, n. 1, p. 1–6, 2002.
- RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; LAZECKY, M.; HLAVÁČOVÁ, I.; DELGADO, J., M.; SOUSA, J.J.; LAMAS-FERNÁNDEZ, F; PERISSIN, D.. Deformation monitoring of dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain). **Procedia Computer Science**, v. 138, p. 346–353, 2018. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.049.
- RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; LAZECKY, M.; RUIZ-CONSTÁN, A.;. 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. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.050.
- SALAMUNI, E. **Tectônica Da Bacia Sedimentar De Curitiba (PP) Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Unesp**, 1998.
- SIMONETTO, E.; DURAND, S.; BURDACK, J.; POLIDORI, L.; MOREL, L.; NICOLAS-DUROY, J. Combination of INSAR and GNSS Measurements for Ground Displacement Monitoring. **Procedia Technology**, v. 16, p. 192–198, 2014. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.083.
- SINGH VIRK, A.; SINGH, A.; MITTAL, S. K. Advanced MT-InSAR Landslide Monitoring: Methods and Trends. **Journal of Remote Sensing & GIS**, v. 07, n. 01, p. 1–6, 2018.
- SNEED, M.; BRANDT, J. T. Detection and Measurement of Land Subsidence Using Global Positioning System Surveying and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1996–2005. **USGS**, , n. June, p. 1996–2005, 2013.
- DEL SOLDATO, M.; CONFUORTO, P.; BIANCHINI, S.; SBARRA, P.; CASAGLI, N. Review of works combining GNSS and insar in Europe. **Remote Sensing**, v. 13, n. 9, 2021. DOI: 10.4172/2469-4134.1000225.
- TANG, Y.; WANG, C.; ZHANG, H.; TAO, L. Subsidence monitoring using ascending and descending SAR data based on coherent target DInSAR. **Sixth International Symposium on Digital Earth: Data Processing and Applications**, v. 7841, n. November 2010, p. 78410J, 2009. DOI: 10.1117/12.873214
- TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. DE; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo, 2003.
- TEMPORIM, F. A.; GAMA, F. F.; MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; SILVA, G. G. Application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in N5E open pit iron mine using TerraSAR-X data, in Carajás Province, Amazon region. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, n. 2, p. 225–235, 2017. DOI: 10.1590/2317-4889201720170006.
- USTUN, A.; TUSAT, E.; YALVAC, S. Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006-2009 by means of GNSS observations. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 10, n. 6, p. 1151–1157, 2010. DOI:10.5194/nhess-10-1151-2010.
- VAZQUEZ-ONTIVEROS, J. R.; MARTINEZ-FELIX, C. A.; VAZQUEZ-BECERRA, G. E.; GAXIOLA-CAMACHO, J.R>; MELGAREJO-MORALES, A.; PADILLA-VELAZCO, J. Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on GPS observations. **Advances in Space Research**, v. 69, n. 1, p. 319–330, 2022. DOI: 10.1016/j.asr.2021.09.018.
- VESTENA, L. R.; KOBIYAMA, M.; SANTOS, L. J. C. Considerações sobre gestão ambiental em áreas cársticas. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 6, n. 6, p. 81–93, 2002. DOI: 10.5380/raega.v6i0.18518.
- WANG, G.; GREUTER, A.; PETERSEN, C. M.; TURCO, M. J. Houston GNSS Network for Subsidence and Faulting Monitoring: Data Analysis Methods and Products. **Journal of Surveying Engineering**, v. 148, n. 4, p. 1–20, 2022. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000399.
- WANG, G.; ZHOU, X.; WANG, K.; KE, X.; ZHANG, Y.; ZHAO, R.; BAO, Y. GOM20: A stable geodetic

reference frame for subsidence, faulting, and sea-level rise studies along the coast of the Gulf of Mexico. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, 2020. DOI: 10.3390/rs12030350.

- WERLICH, R. M. C. **Análise de Alternativas de Processamento GPS para Detecção de Deslocamentos Verticais de Terra em Áreas Urbanizadas**, Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2017.
- 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. DOI: 10.1109/igarss.2003.1295516.
- YALVAC, S. Validating InSAR-SBAS results by means of different GNSS analysis techniques in medium- and high-grade deformation areas. **Environmental Monitoring and Assessment**, 2020. DOI: 10.1007/s10661-019-8009-8.
- YIN, Y.; ZHENG, W.; LIU, Y.; ZHANG, J.; LI, X. Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiaju landslide in Sichuan, China. **Landslides**, v. 7, n. 3, p. 359–365, 2010. DOI: 10.1007/s10346-010-0225-9.
- YUWONO, B.; AWALUDDIN, M.; . N. Land Subsidence monitoring 2016 - 2018 analysis using GNSS CORS UDIP and DinSAR in Semarang. **KnE Engineering**, v. 2019, p. 95–105, 2019. DOI: 10.18502/keg.v4i3.5832.
- 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. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873853.
- ZHANG, Y.; MENG, X. M.; DIJKSTRA, T. A.; JORDAN, C.J.; CHEN, G.; ZENG, R.Q. NOVELLINO, A. Forecasting the magnitude of potential landslides based on InSAR techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 241, n. February, p. 111738, 2020. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111738.
- ZHAO, R.; WANG, G.; YU, X.; SUN, X.; BAO, Y.; GAN, G.; SHEN, S. Rapid Land Subsidence in Tianjin, China Derived from Continuous GPS Observations (2010–2019). **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 382, p. 241–247, 2020. DOI: 10.5194/piahs-382-241-2020.
- ZHOU, C.; LAN, H.; BÜRGMANN, R.; WARNER, T.A.; CLAGUE, J.J.; LI, L.; WU, Y.; ZHAO, X.; ZHANG, Y.; YAO, J. Application of an improved multi-temporal InSAR method and forward geophysical model to document subsidence and rebound of the Chinese Loess Plateau following land reclamation in the Yan'an New District. **Remote Sensing of Environment**, v. 279, n. June, p. 113102, 2022. DOI:10.1016/j.rse.2022.113102.
- ZHU, W.; ZHANG, Q.; DING, X.; ZHAO, C.; YANG, C., QU, F.; QU, W. Landslide monitoring by combining of CR-InSAR and GPS techniques. **Advances in Space Research**, v. 53, n. 3, p. 430–439, 2014. DOI: 10.1016/j.asr.2013.12.003.

### 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). É Mestre e Doutor em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná.



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.