

ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DE TERRENO ATRAVÉS DA TÉCNICA PSP-IFSAR

RELATÓRIO 01/2019:

ANÁLISE DE REFERÊNCIA

Abril 2016 - Dezembro 2018

CPRM

Fevereiro/2019

TELESPAZIO BRASIL S.A.

Telespazio Brasil S.A.

Sede:

Av. Rio Branco, 01 - 1808 - Centro - Rio de Janeiro
CEP.: 20090-003 - Brasil
Tel. +55 21 21413100 - Fax. +55 21 21413170
marketing@telespazio.net.br
www.telespazio.net.br

Telespazio Brasil S.A.

Filial:

Alameda Santos, 234 - 101/106 - São Paulo
CEP.: 01418-000 - Brasil
Tel. +55 11 38784400 – Fax. +55 11 38784415
marketing@telespazio.net.br
www.telespazio.net.br

Status do documento

VERSÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	APROVADO	MOTIVO DE ALTERAÇÃO
2.0	11/10/17	F.Malvarosa	F.Minati	A. Priolo	Primeira versão (Inglês)
1.0	22/02/19	Telespazio Brasil	Fabio Moreira	Raul Silva	Primeira versão (Português)

Objeto:

Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR

Rev
00

Data
13/02/2019

Anexos
00

Pág.
1 de 30

Sumário

1.	Introdução	5
1.1	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	6
1.2	ACRÔNIMOS	7
1.3	REFERÊNCIAS	7
2.	Medidas de Deformação do Terreno por Interferometria SAR.....	9
2.1	PRINCÍPIOS IFSAR	9
2.2	LIMITES E POTENCIALIDADES DO IFSAR.....	14
2.3	TECNOLOGIA PSP-IFSAR	16
3.	Contexto da Área Interesse - Maceió	18
4.	Produtos PSP-IFSAR	18
4.1	PRODUTO NO FORMATO SHAPEFILE	19
4.2	PRODUTO NO FORMATO KMZ	20
5.	Processamento	23
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	23
5.2	MEDIDAS PSP-IFSAR: GEOMETRIA ASCENDENTE.....	24
5.2.1	Dados de Entrada	24
5.2.2	Informações de Processamento.....	25
6.	Resultados	27
6.1	RESULTADOS DAS ANÁLISES PSP-IFSAR ASCENDENTE.....	27

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 2 de 30
---	-----------	--------------------	--------------	-----------------

Lista de Figuras

Figura 1: Área de interesse delimitada pelo polígono vermelho.	5
Figura 2: <i>Quicklook</i> do mapa de velocidades médias dos PSs da análise PSP-IFSAR dos dados COSMO-SkyMed.	6
Figura 3 – Exemplo da amplitude (a) e da fase (b) de uma imagem SAR. Na imagem amplitude é possível reconhecer as assinaturas topográficas, como por exemplo, uma área urbana no canto superior esquerdo e um corpo de água no meio. Enquanto a imagem fase parece como um ruído.	10
Figura 4 – Modelo de aquisição interferométrica (a) e um exemplo de fase interferométrica SAR (b) correspondente à imagem SAR de amplitude apresentada na figura anterior. As assinaturas topográficas são claramente visíveis na fase interferométrica.	10
Figura 5 – Modelo de aquisição interferométrica. Se a topografia da cena imaginada for conhecida, é possível remover este componente do sinal de fase e procurar o eventual deslocamento dos alvos observados.	11
Figura 6 – Linha de direção da visada	12
Figura 7 – Decomposição da linha de visada.	12
Figura 8 – A linha vermelha representa o componente do deslocamento do terreno medido pela técnica PSP-IFSAR para a geometria ascendente de aquisição.	13
Figura 9 – A linha vermelha representa o componente do deslocamento do terreno medido pela técnica PSP-IFSAR para a geometria descendente de aquisição.	13
Figura 10 – Modelo de aquisição interferométrica. Mudanças nas condições atmosféricas entre as duas aquisições introduzem atrasos de fase que alteram a medida da topografia ou do deslocamento.	14
Figura 11 - Exemplo de distribuição espacial de PS (pontos vermelhos) sobreposto a uma imagem óptica. Os PS correspondem a áreas urbanas, ferrovias, rodovias, edifícios e infraestruturas. Não há pontos correspondentes em áreas cultivadas e com vegetação, ou corpos de água.	16
Figura 12 - Área de Interesse (AOI)	18
Figura 13: Exemplo de estrutura de arquivo <i>dbf</i> referente ao <i>shapefile</i> PSP-IFSAR ascendente.	20
Figura 14: Atributos PS de referência (geometria ascendente).	20
Figura 15: Exemplo de visualização KMZ (figura do topo) para um nível de zoom correspondente a um fator <i>multilook</i> de 70m x 70m x 70m (direções L, N e Altura). A imagem do topo representa a velocidade média obtida a partir das imagens COSMO-SkyMed ascendente. O gráfico de baixo representa a informação associada a um PS selecionado.	22
Figura 16 - O Polígono vermelho identifica a área de interesse e a estrela amarela identifica a zona onde o ponto de referência foi selecionado para as medidas PSP-IFSAR.	23
Figura 17: Mapas de velocidades médias relevantes em geometria ascendente referente ao período de Abril de 2016 a Dezembro de 2018. O <i>stack</i> ascendente é constituído por 60 imagens SAR COSMO-	

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 3 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	-----------------

SkyMed HImage, sobre uma área da cidade de Maceió, Brasil. As medidas de PS estão sobrepostas sobre uma imagem óptica do Google Earth..... 27

Figura 18 – Uma visão em detalhe do mapa anterior, com foco nos bairros de Pinheiro e Levada. Dois PSs com movimentos significativos estão identificados por círculos pretos. Os dois gráficos mostram as evoluções do deslocamento temporal dos dois pontos selecionados (de cima para baixo: ponto n.1, ponto n.2)..... 29

<i>Objeto:</i> <i>Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR</i>	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 4 de 30
--	------------------	---------------------------	---------------------	------------------------

1. Introdução

Este relatório apresenta os resultados obtidos pela análise PSP-IFSAR dos dados SAR do COSMO-SkyMed adquiridos em geometria ascendente sobre uma grande área na cidade de Maceió, Alagoas, Brasil, no período de Abril de 2016 a Dezembro de 2018. O conjunto de dados usado no processamento PSP-IFSAR compreende 60 imagens SAR com resolução espacial de 3 m x 3 m.

A Figura 1 a seguir mostra a área de interesse.



Figura 1: Área de interesse delimitada pelo polígono vermelho.

A análise mede o movimento em alvos selecionados (chamados *Persistent Scatterers* ou PS) na área investigada e, desta forma, destaca alguns movimentos críticos no terreno no intervalo de tempo coberto pelos dados. O *quicklook* das velocidades médias dos PSs relevantes à análise realizada é apresentado na Figura 2.

A análise consiste na estimativa das velocidades médias e evoluções temporais das deformações do terreno no período investigado (Abril/2016 – Dezembro/2018), em correspondência ao conjunto de pontos PSs identificados pelo processamento PSP-IFSAR.

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 5 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	------------------------

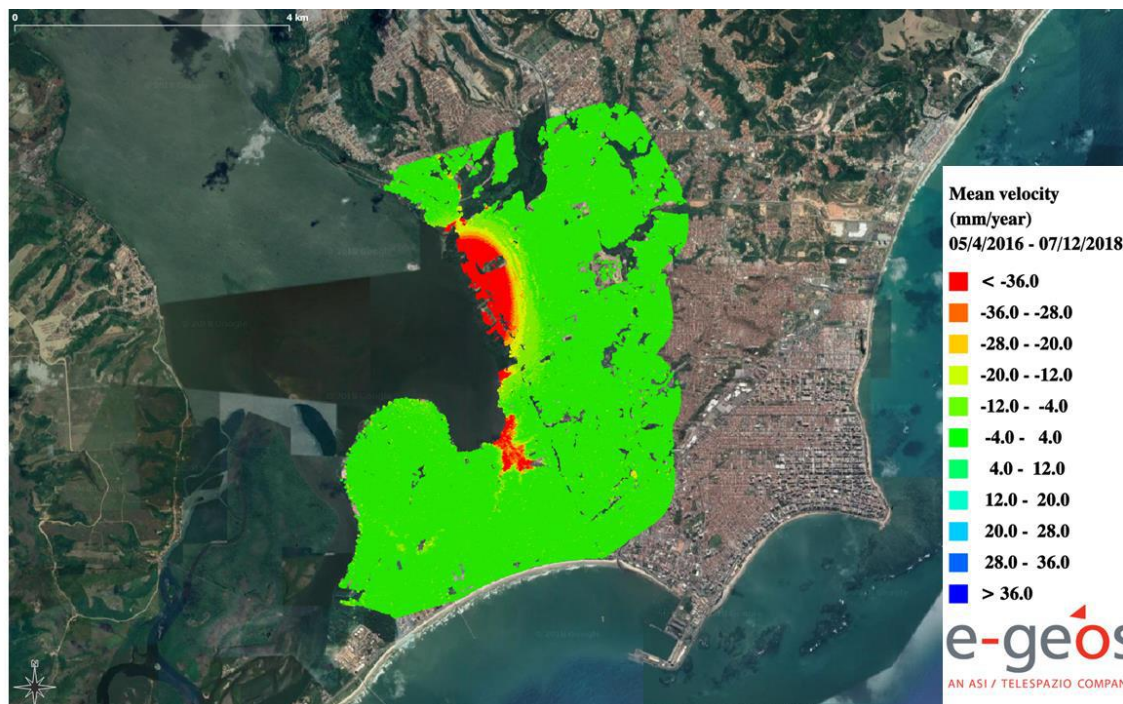


Figura 2: Quicklook do mapa de velocidades médias dos PSs da análise PSP-IFSAR dos dados COSMO-SkyMed.

1.1 Estrutura do Documento

Nas seções seguintes encontram-se reportados:

- Uma breve descrição da técnica PSP IFSAR;
- O conjunto de dados utilizado na análise;
- Abordagem do processamento, critério de seleção e característica dos dados, e parâmetros;
- Uma breve análise dos resultados obtidos com a análise de monitoramento PSP-IFSAR do conjunto de dados COSMO-SkyMed ascendente.

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 6 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	-----------------

1.2 Acrônimos

Acrônimo	Descrição
AOI	Área of Interest - Área de interesse
Bn	Normal Baseline - Linha de Base Normal
Bt	Temporal Baseline – Linha de Base Temporal
CSK	COSMO-SkyMed
GIS	Geographic Information System – Sistemas de Informação Geográfica
LOS	Line of Sight – Linha de Visada
PRF	Pulse Repetition Frequency – Frequência de Repetição de Pulso
PS	Persistent Scatterers – Espalhadores Permanetes
PSP-IFSAR	Persistent Scatterers Pair- SAR Interferometry
SAR	Synthetic Aperture Radar – Radar de Abertura Sintética

1.3 Referências

[1] M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa, F. Minati (2008), A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images, in Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '08), Boston, Ma, USA, 6-11 July 2008.

[2] M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa, F. Minati and F. Trillo (2009), Method of persistent scatterer pairs (PSP) and high resolution SAR interferometry, in Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '09), Cape Town, South Africa, July 2009.

[3] M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa, F. Minati, F. Trillo, F. Vecchioli (2010), Persistent Scatterer Pairs (PSP) Approach in Very High Resolution SAR Interferometry, in EUSAR 2010 – 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 7-10 June 2010.

[4] M. Costantini, T. Chen, Y. Xu, F. Trillo, F. Vecchioli, L. Kong, D. Jiang, Q. Hu (2011), High resolution ground deformations monitoring by COSMO-SkyMed PSP SAR interferometry:

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 7 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	-----------------

accuracy analysis and validation, in Proceedings of the ESA International Fringe 2011 Workshop, Frascati, Italy, Sept. 2011.

[5] M. Costantini, F. Malvarosa, F. Minati (2012), A General Formulation for Redundant Integration of Finite Differences and Phase Unwrapping on a Sparse Multidimensional Domain, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, no. 3, pp. 758-768, doi 10.1109/TGRS.2011.2162630, 2012.

<i>Objeto:</i> <i>Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR</i>	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 8 de 30
--	------------------	---------------------------	---------------------	------------------------

2. Medidas de Deformação do Terreno por Interferometria SAR

2.1 Princípios IFSAR

A interferometria por repetição de passagem de satélite de radar de abertura sintética (IFSAR) é uma técnica muito eficaz para mapear e monitorar o deslocamento de terrenos, tais como subsidência, deslizamentos de terra, terremotos e fenômenos vulcânicos. A técnica IFSAR mede o deslocamento do terreno com precisão milimétrica através do processamento de dados adquiridos por satélites que orbitam a 600 quilômetros acima da Terra.

O princípio fundamental desta técnica é que a diferença de fase entre duas imagens SAR, adquiridas em momentos diferentes e com ângulos de visada ligeiramente diferentes, está relacionada à topografia da cena observada, bem como aos seus deslocamentos do terreno. De facto, o sinal transmitido - a imagem SAR - é coerente, isto é, tem componentes de amplitude e fase. A amplitude do sinal recebido depende do comprimento de onda do sinal transmitido, assim como da geometria e das características físicas da cena observada; a fase do sinal retroespalhado, por outro lado, depende da distância entre a antena do radar e o alvo e das características do meio de transmissão e do alvo.

Um exemplo de amplitude e sinal de fase associado a uma imagem de radar é relatado na Figura 3. Mesmo que a imagem da amplitude (à esquerda) apresente diferenças significativas em relação a uma imagem óptica, as características da cena observada ainda estão claramente presentes; é possível reconhecer uma área urbana (área branca) no canto superior esquerdo, um corpo de água (área preta) no meio, e os efeitos de encurtamento e parada associados às assinaturas topográficas (onde as montanhas parecem "inclinarem-se" para o sensor). Por outro lado, a fase de uma única imagem SAR (à direita) parece conter apenas ruído.

A situação muda significativamente se olharmos para a diferença de fase, isto é, o interferograma, entre duas imagens SAR. A observação de um mesmo alvo a partir de dois ângulos de visada ligeiramente diferentes e assumindo que as características do meio de transmissão e do alvo visualizado não se alteram entre as duas aquisições, a diferença de fase terá relação apenas com as diferenças nos trajetos de viagem das duas aquisições. Nesse caso, a diferença de fase assume a forma apresentada na Figura 4 (b). Essa diferença de fase é fortemente correlacionada à topografia da cena imageada, e o interferograma se parece com linhas de contorno. A transição da cor vermelha para a cor azul é chamada de "franja interferométrica" e representa um ciclo de fase, ou seja, uma rotação do sinal de fase de 360°. A distância entre as duas antenas nos dois tempos de aquisição é denominada "linha de base

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 9 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	------------------------

interferométrica”. Este parâmetro influencia a sensibilidade em relação à topografia: se a linha de base for nula, o interferômetro é cego, isto é, a diferença de fase é de modo idêntico nula.

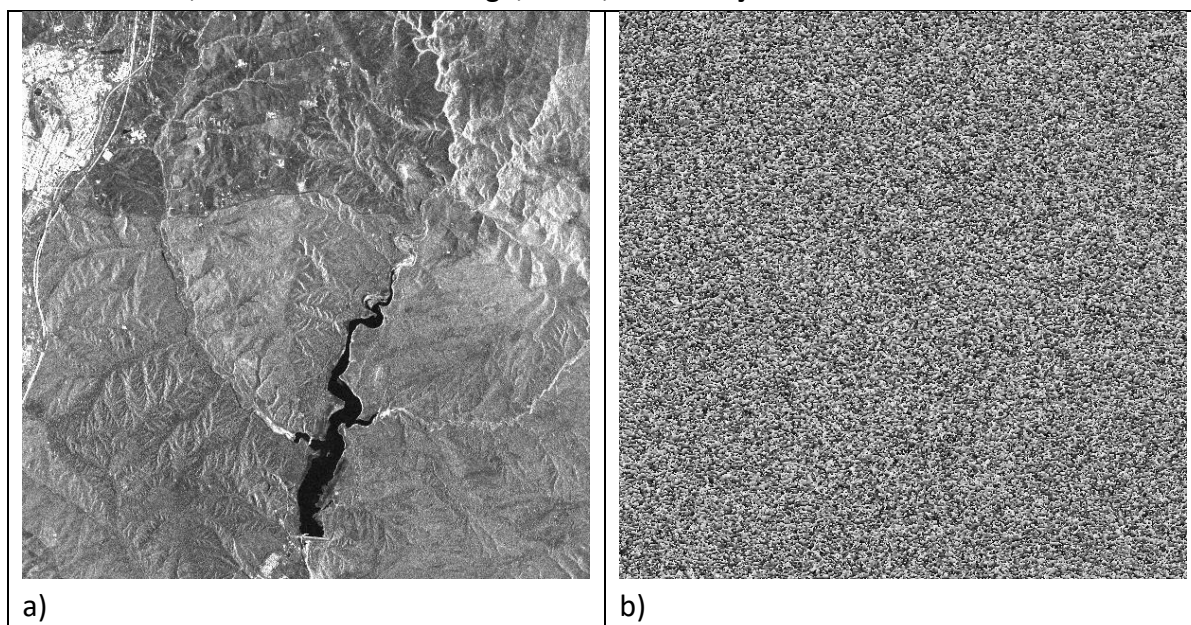


Figura 3 – Exemplo da amplitude (a) e da fase (b) de uma imagem SAR. Na imagem amplitude é possível reconhecer as assinaturas topográficas, como por exemplo, uma área urbana no canto superior esquerdo e um corpo de água no meio. Enquanto a imagem fase parece como um ruído.

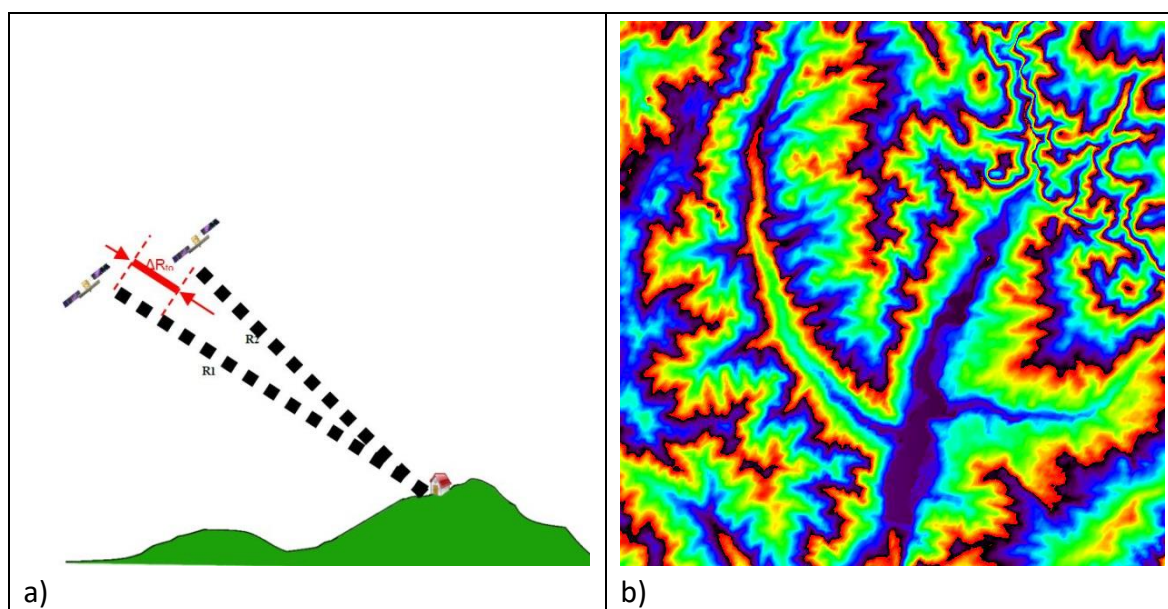


Figura 4 – Modelo de aquisição interferométrica (a) e um exemplo de fase interferométrica SAR (b) correspondente à imagem SAR de amplitude apresentada na figura anterior. As assinaturas topográficas são claramente visíveis na fase interferométrica.

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 10 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	------------------

O incremento do componente da linha de base na direção ortogonal ao olhar do radar, torna o interferômetro cada vez mais sensível à topografia, aumentando proporcionalmente a frequência de franja interferométrica. Em qualquer condição, o comprimento da linha de base deve ser menor que um valor denominado “linha de base crítica”, uma vez que, em correspondência a esse valor, as franjas interferométricas são indistinguíveis e a fase medida é inútil.

Quando a topografia da cena observada é conhecida, é possível remover este componente da imagem SAR; Se a linha de base interferométrica for nula, a contribuição da topografia é nula. Em ambos os casos, é possível analisar o interferograma com o componente relacionado à topografia removido e, assim, medir as diferenças devido aos deslocamentos do alvo entre as aquisições de imageamento (Figura 5).

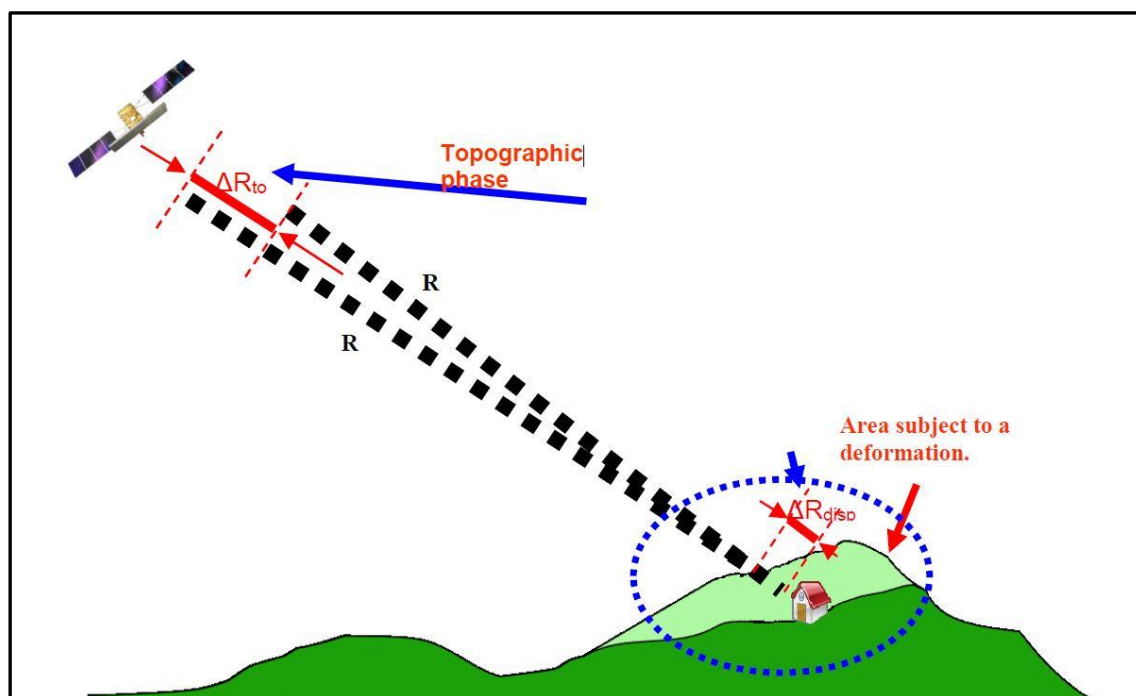


Figura 5 – Modelo de aquisição interferométrica. Se a topografia da cena imaginada for conhecida, é possível remover este componente do sinal de fase e procurar o eventual deslocamento dos alvos observados.

A técnica interferométrica é capaz de medir a projeção do deslocamento ao longo da linha de visada (LOS) do sensor (Figura 6).

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 11 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	------------------

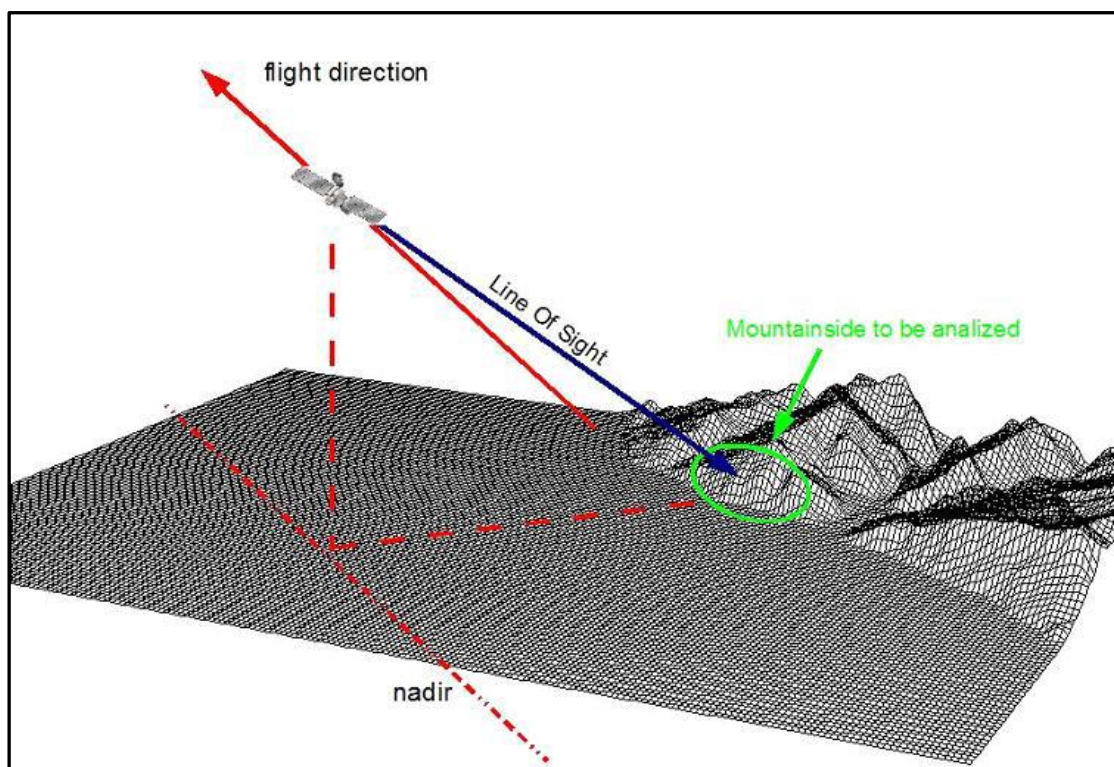


Figura 6 – Linha de direção da visada

Em geral, a direção da linha de visada pode ser decomposta em três componentes: norte, leste e vertical (Figura 7).

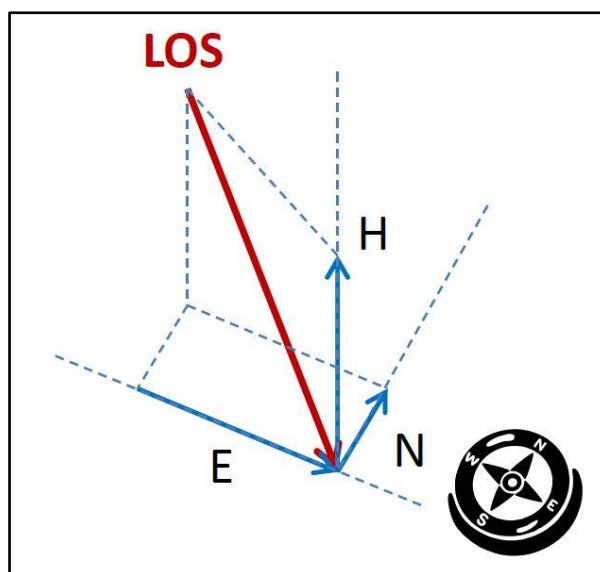


Figura 7 – Decomposição da linha de visada

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 12 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

Com os sistemas de satélites atualmente disponíveis, tais como, a constelação COSMO-SkyMed, é possível realizar a análise interferométrica com duas geometrias complementares (ascendente/descendente ou esquerda/direita), sendo possível discriminar as componente leste (E) e vertical (H) do deslocamento, enquanto o sistema é cego em relação ao componente norte (N). Para cada geometria de observação, os três cossenos de direção são fornecidos. Para entender melhor o significado das medições interferométricas, um exemplo relativo a um escorregamento na presença de inclinação do terreno é mostrado na Figura 8 e Figura 9.

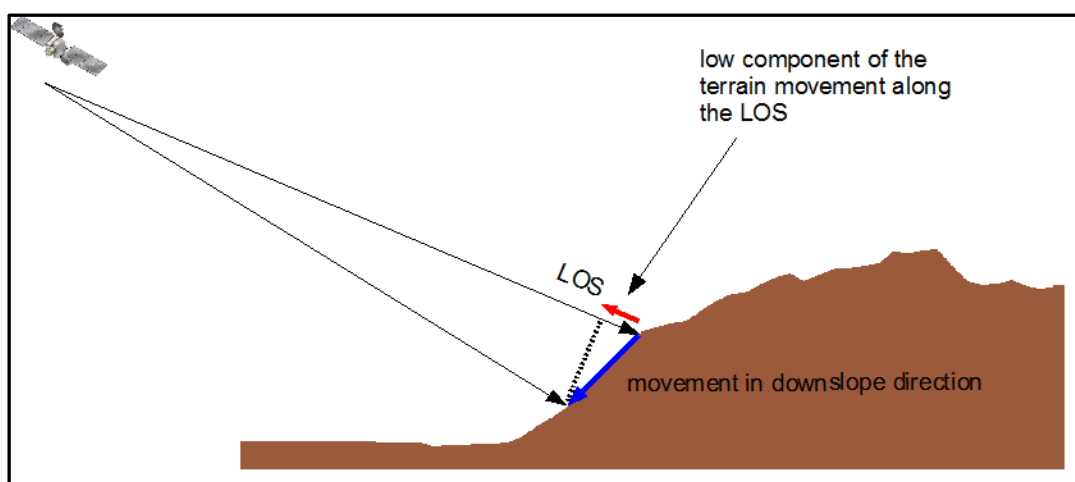


Figura 8 – A linha vermelha representa o componente do deslocamento do terreno medido pela técnica PSP-IFSAR para a geometria ascendente de aquisição.

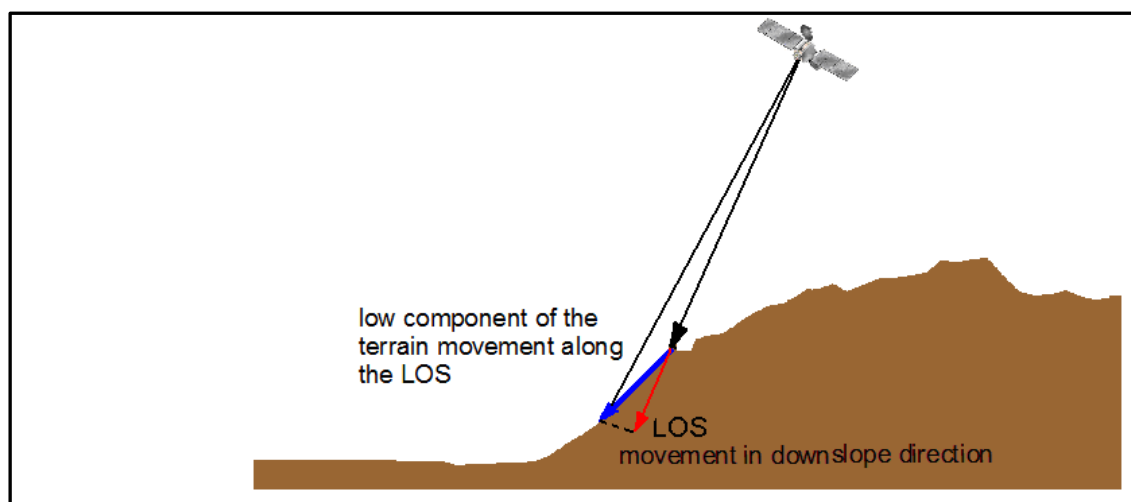


Figura 9 – A linha vermelha representa o componente do deslocamento do terreno medido pela técnica PSP-IFSAR para a geometria descendente de aquisição.

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 13 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	------------------

Os exemplos relatados nas figuras anteriores mostram o mesmo escorregamento medido com duas geometrias diferentes, ascendente e descendente. Na Figura 8, o componente do movimento do terreno ao longo do LOS indica que o ponto de medição se move na direção do sensor: neste caso, o deslocamento é considerado positivo. Na Figura 9, em vez disso, o componente do movimento do terreno ao longo do LOS indica que o ponto de medição se afasta do sensor: neste caso, o deslocamento é considerado negativo. A combinação dos dois conjuntos de medições permite reconstruir os componentes horizontais (leste) e verticais do deslocamento.

No caso dos movimentos verticais, quanto aos fenômenos de subsidência, apenas uma geometria de observação é suficiente para reconstruir o vetor de deslocamento.

2.2 Limites e potencialidades do IFSAR

A interferometria de SAR por repetição explora a diferença de fase entre diferentes aquisições para recuperar informações sobre a topografia da cena observada e suas alterações ao longo do tempo. A precisão nas medições de deslocamento é uma fração do comprimento de onda do radar, e considerando sinais de SAR de banda X, e.g. os sensores SAR COMSO-SkyMed (com cerca de 3 cm de comprimento de onda) podem atingir valores milimétricos.

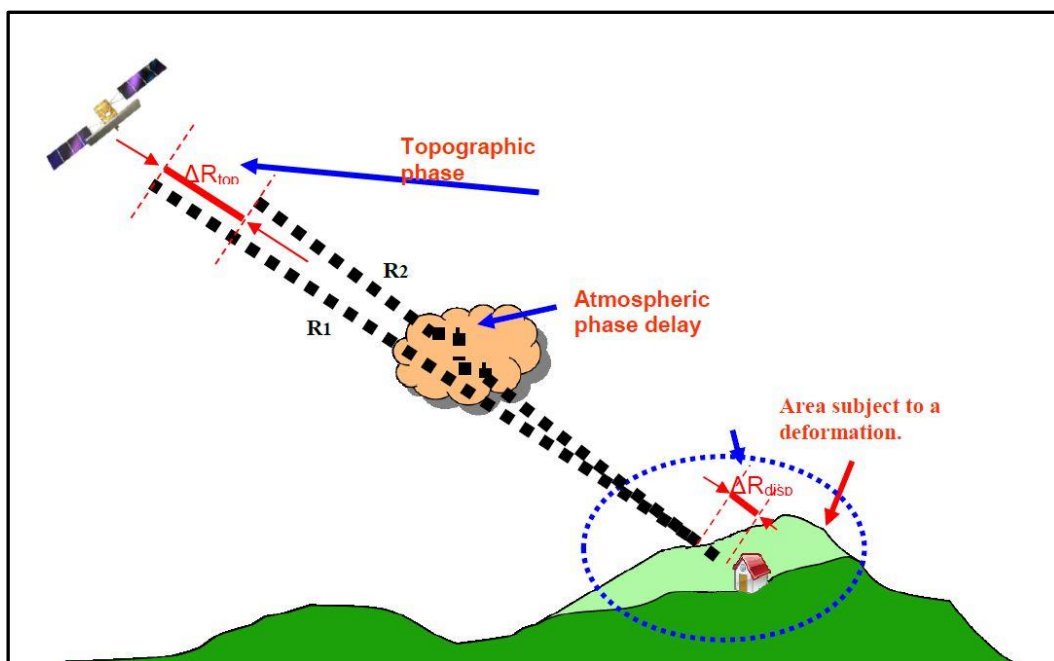


Figura 10 – Modelo de aquisição interferométrica. Mudanças nas condições atmosféricas entre as duas aquisições introduzem atrasos de fase que alteram a medida da topografia ou do deslocamento.

Objeto:	Rev	Data	Anexos	Pág.
Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	00	13/02/2019	00	14 de 30

Extraír essa informação é uma tarefa complexa. De fato, mudanças nas características geométricas ou físicas do alvo, no mesmo nível do comprimento de onda do radar, introduzem variações de fase que superam a contribuição devido à distância entre o radar e o alvo e causam a decorrelação de fase.

Alterações nas características do meio de transmissão, isto é diferentes condições atmosféricas entre as aquisições, introduzem um atraso de fase que afecta na estimativa da distância entre o radar e o alvo (Figura 10). Além disso, a informação da fase é dobrada (*wrapped*), isto é, só pode ser medida dentro de um ciclo, ou 360°; portanto, para recuperar as informações de deslocamento, o número apropriado de ciclos deve ser adicionado à fase medida para reconstruir a diferença de fase absoluta correta.

Geralmente, as medições são possíveis em pontos esparsos, que precisam ser identificados durante o processamento e correspondem a objetos no solo que exibem propriedades de retroespalhamento no sinal do radar que são estáveis ao longo do tempo. Esses pontos, denominados Espalhadores Persistentes (Persistent Scatterers PSs), são normalmente encontrados em áreas não cultivadas e pouco vegetadas, bem como em zonas urbanizadas, e em particular correspondem a estruturas feitas pelo homem ou naturais como edifícios, rochas, etc. Para identificar os PSs é necessário analisar longas séries de aquisições, onde o aumento no número de imagens processadas permite realizar estatísticas mais confiáveis e fornecem resultados mais precisos. Uma típica distribuição espacial de PS é ilustrada na Figura 11.

Para extrair as informações de deslocamento, outras contribuições de fase devem ser identificadas e removidas do sinal. A e-Geos desenvolveu uma abordagem avançada de interferometria por espalhador persistente, denominada Persistent Scatterer Pairs (PSP) - IFSAR ([1]-[5]), que se caracteriza por soluções originais que superam as principais limitações das técnicas clássicas, que no geral prejudicam a precisa determinação de deslocamentos no terreno.

A seguir, são apresentadas breves descrições da técnica por *Persistent Scatterer* PS e, em particular, das soluções PSP - IFSAR adoptadas pela e-Geos.

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 15 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------



Figura 11 - Exemplo de distribuição espacial de PS (pontos vermelhos) sobreposto a uma imagem óptica. Os PS correspondem a áreas urbanas, ferrovias, rodovias, edifícios e infraestruturas. Não há pontos correspondentes em áreas cultivadas e com vegetação, ou corpos de água.

2.3 Tecnologia PSP-IFSAR

A interferometria SAR mede a diferença de fase entre dois sinais de retorno do mesmo alvo. Como explicado no parágrafo anterior, essa fase pode ser decomposta em diferentes componentes. Sendo λ o comprimento de onda do radar, d o deslocamento do alvo entre duas aquisições, c_q o coeficiente relacionado à diferença entre as duas geometrias de aquisição, h a elevação do alvo, ϕ_a o atraso de fase associado à mudança das condições atmosféricas e ϕ_n o ruído; a fase interferométrica ϕ pode ser expressa como a soma destas diferentes componentes:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} + c_q h + \phi_a + \phi_n$$

A medida da deformação do terreno d a partir de dados SAR, como já mencionado, é uma tarefa complexa e requer a identificação de pontos onde a componente de ruído é desprezada e a separação da informação de deslocamento do terreno a partir de outros componentes do sinal de fase é obtida.

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 16 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	------------------

A e-Geos desenvolveu uma metodologia avançada de *persistent scatterer* chamada de *Persistent Scatterer Pairs (PSP)*-IFSAR ([1]-[3]). Os pontos-chaves da tecnologia PSP-IFSAR consistem na capacidade de detectar os PSs e medir seus movimentos ao mesmo tempo. Técnicas clássicas de PS requerem a identificação preliminar dos PSs (candidatos) baseado na amplitude do sinal SAR, seguido da recuperação das várias componentes do sinal de fase relacionados a um número reduzido de pontos. Nestas metodologias, é fundamental a calibração dos dados, tanto radiometricamente, como do ponto de vista da fase, em particular, calibrar a fase significa remover as contribuições de fases atmosférica e orbital, um passo necessário não somente para a análise, como também para a identificação de todos os possíveis PSs. Tipicamente, contribuições de fases atmosféricas e orbital para todos os pontos de uma imagem em resolução plena são estimadas pela média da interpolação local ou global (baseado em modelo) ou ajustes, começando pelo atraso de fase estimado no set preliminar de pontos selecionados através da análise de dispersões de amplitude. Nestes métodos, os resultados são sensíveis à densidade de medidas obtidas no processamento preliminar (e.g. pode ocorrer que medidas preliminares não sejam obtidas em grandes áreas onde os PSs são isolados ou escassos). Além disso, estes métodos necessitam de um modelo de artefatos atmosféricos e histórico da deformação ou refinamentos sucessivos.

A técnica PSP-IFSAR contorna estes problemas explorando a fase entre pares de pontos vizinhos (arcos). Comparando o sinal SAR em determinado ponto com o sinal em outros pontos próximos para eliminar a necessidade de pré-processamento de calibração da amplitude e fase do dado. Mais especificamente, a remoção da contribuição de fases atmosférica e orbital e, em geral, de todas as interferências espacialmente correlacionadas, não é mais necessária uma vez que eles afetam de uma forma similar o sinal em dois pontos vizinhos. O processamento em arcos, diferentemente do processamento dos pontos isolados, pode ser computacionalmente muito pesado, contudo, não é necessário explorar todos os pares de pontos possíveis. A tecnologia PSP-IFSAR é baseada em um algoritmo inteligente e eficiente capaz de selecionar um set mínimo de arcos necessário para identificar os pontos procurados, isto é, todos os PSs.

Uma vez identificados os PS, é necessário reconstruir o deslocamento de cada ponto começando das medidas diferenciais entre pares de pontos. Uma metodologia robusta e confiável de integração de diferença finita e desdobramento de fase foi implementada para este propósito [5]. Estas soluções inovadoras fazem a metodologia PSP-IFSAR capaz de fornecer resultados mais confiáveis e precisos.

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 17 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

3. Contexto da Área Interesse - Maceió

A área de interesse compreende uma porção da cidade de Maceió, Brasil, conforme pode ser visualizado na Figura 12. A análise PSP-IFSAR dos dados ascendentes do sistema COSMO-SkyMed permitiu extrair um grande número de PS sobre a área urbana, com exceção em algumas pequenas áreas vegetadas onde nenhum ponto de medida foi identificado como já explicado nas seções anteriores.



Figura 12 - Área de Interesse (AOI)

4. Produtos PSP-IFSAR

Os produtos PSP-IFSAR são entregues em dois formatos:

- Formato ESRI shape file
- Formato KMZ

Para cada PS foram geradas as seguintes informações:

Posição do PS: a posição do PS, em coordenadas geográficas e elipsoide de referência WGS84. As medidas da posição dos PSs são relativas. Para melhor entender a correspondência do PS com o alvo no terreno, é obtida a posição absoluta ajustando-se a posição do PS detectado com

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 18 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

cartografia disponível, ortofotos, etc. Na ausência dessas informações, são utilizadas as ortoimagens do Google Earth como referência absoluta;

Velocidade Média do PS no período analisado: a velocidade média do PS, expressa em mm/ano é calculada no intervalo temporal entre a primeira e a última aquisição SAR. A velocidade média do PS é medida ao longo da linha de visada do sensor (LOS) e refere-se a um PS de referência, considerado estável;

Evolução Temporal do Deslocamento do PS: os deslocamentos dos PSs, expressos em mm, relativos à aquisição SAR de referência, fornecido para cada data de aquisição no período analisado. Os deslocamentos de PS são medidos ao longo da LOS e refere-se a um PS de referência, considerado estável, e à data de referência (entre as datas de aquisição).

4.1 Produto no formato Shapefile

O produto é fornecido em formato vetorial *shapefile* ESRI compatível com todos os softwares GIS proprietários e livres.

O *shapefile* ESRI, ou simplesmente *shapefile*, é um dado vetorial geoespacial para software de sistema de informação geográfica (proprietário ou livre). Os *shapefiles* descrevem feições espaciais, tais como pontos, linhas e polígonos, representando, por exemplo, rede de drenagem, rios e lagos. Normalmente, cada feição tem atributos que a descreve. O formato *shapefile* é útil para análise de dados, graças às possibilidades oferecidas pelos softwares GIS.

As feições dos produtos *shapefile* PSP-IFSAR são pontos, os quais representam os PSs obtidos. Para cada PS (ou feição) do *shapefile* foram fornecidos os seguintes atributos:

- **CODE:** código alfanumérico que identifica o PS.
- **HEIGHT:** a altura do PS com relação ao elipsoide WGS84.
- **VEL:** a velocidade média dos PSs no período analisado.
- **V_STDEV:** desvio padrão estimado das medidas das velocidades médias
- **COHERENCE:** valores de 0 a 1 representando a coerência temporal do PS, valores mais altos correspondem a um bom PS.
- **DYYYYMMDD:** no *dbf* associado ao *shapefile* há vários desses atributos, seu número corresponde às datas de aquisições das imagens usadas para o processamento. Para a atual análise, há 32 atributos DYYYYMMDD. Cada atributo contém o deslocamento do PS na data DD / MM / YYYY (dia/mês/ano).

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 19 de 30
---	-----------	--------------------	--------------	------------------

PSP_CSK_HI_08_HH_RA_20160405_20181207_MACEIO :: Feições de totais: 1123173, filtrado: 81943, selecionado: 0

	CODE	HEIGHT	H_STDEV	VEL	V_STDEV	COHERENCE	D20160405	D20160417	D20160507	D20160519	D20160608	D20160624	D20160710	D20160726	D20160811	D20160827
1	000000	-4.9	0.2	1.3	0.3	0.74	0.0	-2.3	0.4	2.1	-3.9	-1.2	-4.9	-6.4	-4.7	-6.4
2	000001	-5.5	0.2	0.3	0.3	0.75	0.0	-2.1	0.7	2.5	-3.7	-0.9	-4.7	-6.4	-4.5	-6.4
3	000002	-5.6	0.1	-6.7	0.3	0.62	0.0	-0.1	2.1	2.0	-7.3	-5.8	-9.1	-13.1	-10.2	-13.7
4	000003	-4.0	0.1	-0.3	0.3	0.67	0.0	-2.2	0.9	2.8	-2.3	0.3	-2.5	-3.2	-1.3	-1.6
5	000004	-5.0	0.2	1.3	0.3	0.70	0.0	-2.3	0.6	2.2	-3.4	-1.0	-4.4	-5.8	-4.5	-6.1
6	000005	-5.7	0.2	0.8	0.3	0.71	0.0	-1.8	1.5	3.3	-2.3	0.4	-3.1	-4.6	-3.1	-5.0
7	000006	-4.6	0.1	-0.5	0.3	0.74	0.0	-0.9	1.5	3.0	-0.8	0.0	-2.1	-4.2	-1.3	-4.1
8	000007	-5.5	0.1	0.3	0.3	0.78	0.0	-1.1	1.6	2.9	-0.7	0.3	-1.8	-3.8	-0.8	-3.7
9	000008	-2.6	0.1	-1.2	0.2	0.65	0.0	-1.5	0.3	1.0	-3.0	-2.3	-4.3	-6.2	-3.2	-5.7
10	000009	-3.3	0.1	-0.8	0.2	0.63	0.0	-1.5	1.0	1.8	-1.9	-1.0	-3.0	-5.0	-2.1	-4.8
11	00000A	-4.5	0.1	0.0	0.3	0.75	0.0	-2.4	1.2	2.6	-2.4	-1.8	-3.6	-5.7	-1.7	-5.7
12	00000B	-5.3	0.1	0.3	0.3	0.76	0.0	-2.2	1.2	2.6	-2.7	-2.2	-3.9	-5.9	-2.1	-5.8
13	00000C	-4.5	0.1	-0.2	0.3	0.73	0.0	-2.4	0.8	2.1	-3.3	-2.9	-5.0	-7.2	-3.4	-7.5
14	00000D	-5.4	0.1	0.1	0.3	0.78	0.0	-2.2	1.0	2.4	-3.1	-2.8	-4.8	-7.0	-3.2	-7.1
15	00000E	-6.0	0.1	-0.2	0.3	0.66	0.0	-1.7	1.3	2.6	-3.1	-2.9	-5.3	-7.6	-4.2	-7.8

Mostrar todas as feições

Figura 13: Exemplo de estrutura de arquivo *dbf* referente ao *shapefile* PSP-IFSAR ascendente.

As Figura 13 e 14 apresentam a estrutura dos arquivos *dbf* referentes ao *shapefile* ESRI PSP-IFSAR da geometria ascendente.

É importante salientar que as medidas PSP-IFSAR são relativas a uma data de referência e a um ponto de referência. Por esta razão, as medidas de deslocamentos relativas à data de referência são iguais à zero. No exemplo apresentado na Figura 13 a data de referência corresponde à primeira data do conjunto de dados ascendente do COSMO-SkyMed (05/04/2016) e, por esta razão, o atributo **D20160405** é igual à zero para este PS.

Da mesma forma, o deslocamento, a velocidade média e o desvio padrão do PS de referência (**CODE 08C9C6**), considerado sem movimentação, são iguais à zero (Figura 14).

PSP_CSK_HI_08_HH_RA_20160405_20181207_MACEIO :: Feições de totais: 1123173, filtrado: 1, selecionado: 1

	CODE	HEIGHT	H_STDEV	VEL	V_STDEV	COHERENCE	D20160405	D20160417	D20160507	D20160519	D20160608	D20160624	D20160710	D20160726	D20160811	D20160827
1	08C9C6	34.4	0.0	0.0	0.0	0.78	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Mostrar feições selecionadas

Figura 14: Atributos PS de referência (geometria ascendente).

4.2 Produto no formato KMZ

Os produtos PSP-IFSAR são fornecidos também em formato KMZ para efeito de visualização rápida. Um arquivo KMZ é um arquivo KML compactado. Um arquivo KML especifica um grupo de feições (lugares, imagens, polígonos, modelos 3D, etc) para serem mostradas no Google Earth, mapas e dispositivos móveis, ou em qualquer software geoespacial que tenha

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 20 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	------------------

implementado a codificação KML. O objetivo principal de fornecer os produtos neste formato é a visualização rápida e confortável dos pontos de medidas através do software Google Earth.

A estrutura dos arquivos KMZ dos produtos PSP-IFSAR está descrita a seguir. O diretório principal, contendo todos os dados, é chamado de KMZ_PSP_CSK_HI_OB_HH_RA_20160405-20181207_MACEIO. O diretório principal contém o subdiretório com todos os arquivos necessários para visualizar os pontos PS e muitos outros arquivos KMZ, cada um representa um link para os arquivos a serem carregados, dependendo do fator de zoom na aplicação Google Earth. Para visualizar esses arquivos, se a versão do Google Earth atualizada estiver instalada, basta apenas clicar no arquivo chamado **PSP_CSK_HI_OB_HH_RA_20160405-20181207_MACEIO_ML.kmz** no diretório principal. Não considere outros arquivos para carregar estes produtos na aplicação Google Earth.

Para garantir o carregamento rápido dos pontos na aplicação Google Earth, é feita uma divisão piramidal dos PSs. Dependendo do fator de zoom da AOI, um número fixo de pontos é visualizado. Para níveis de alto zoom todos os PSs irão aparecer. O número reduzido de pontos, para cada nível, é obtido por uma média de todas as informações associadas a cada PS em um cubo de X metros a Leste, Y metros a Norte e Z metros na direção da altura (operação multilook). Por exemplo, no nível de zoom representado pela Figura 15, o fator *multilook* é de 70x70x70: isto significa que cada ponto visualizado contém as seguintes informações:

- posições (Leste, Norte, Altura) correspondentes ao baricentro dos PSs incluídos em uma janela de 70 m x 70 m x 70 m (direções Leste, Norte e Altura);
- velocidade média correspondente à média de todas as velocidades dos PSs incluídos em uma janela de 70 m x 70 m x 70 m (direções Leste, Norte e Altura);
- altura corresponde a uma média de todos os valores de altura dos PSs incluídos em uma janela de 70 m x 70 m x 70 m (direções Leste, Norte e Altura);
- gráficos de deslocamentos correspondentes a cada data de aquisição, são uma média de valores de deslocamentos de PSs incluídos em uma janela de 70 m x 70 m x 70 m (direções Leste, Norte e Altura).

Para visualizar a informação associada a um ponto basta clicar neste ponto. A informação aparece em um balão retangular. O fator *multilook* é indicado no campo CODE do balão.

As medidas em resolução plena (associadas a cada PS, como no formato *shapefile*) são visíveis quando o fator de *multilook* é igual a 1x1x1.

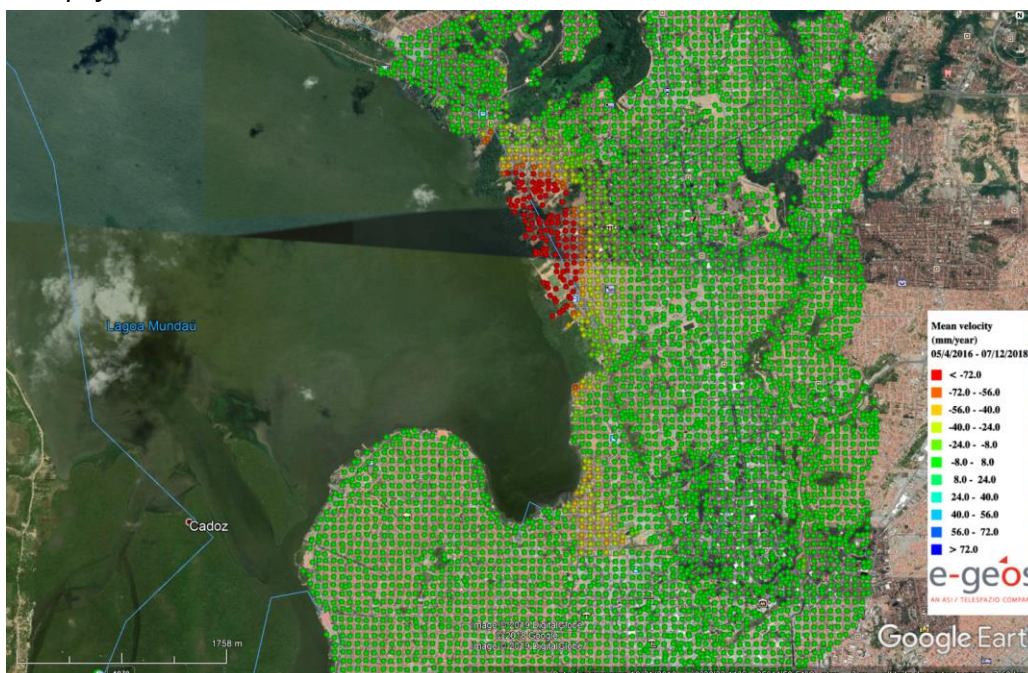
Os valores de altura de PS, indicado no formato KMZ, são relativos ao nível do mar e não ao elipsoide WGS84.

A deformação medida é também representada pela escala de cores visíveis no canto inferior direito da janela do Google Earth. Nesta escala, indo do verde ao vermelho, o PS está se

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 21 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

movimentando rápido e para longe do sensor, enquanto que, do verde para o azul, o PS está se movimentando rápido no sentido do sensor.

É importante notar que não há correspondência entre o campo **CODE** do KMZ e o atributo **CODE** do *shapefile*.



Code: ML70X70X70_08C2

Mean vel: -86.6 mm/year

Coherence: 0.70

Height: 26.97 m

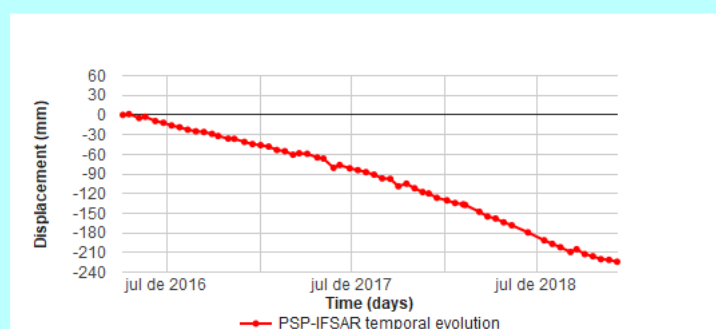


Figura 15: Exemplo de visualização KMZ (figura do topo) para um nível de zoom correspondente a um fator *multilook* de 70m x 70m x 70m (direções L, N e Altura). A imagem do topo representa a velocidade média obtida a partir das imagens COSMO-SkyMed ascendente. O gráfico de baixo representa a informação associada a um PS selecionado.

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 22 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

5. Processamento

5.1 Considerações Gerais

A técnica de interferometria por *persistent scatterer* é baseada na identificação de pontos nas imagens, os quais mantêm a assinatura de radar estável ao longo do período analisado e na extração de informação de deslocamento a partir da fase interferométrica do PS identificado. Esta técnica é capaz de medir deslocamentos relativos entre pontos e a viabilidade das medidas depende da distribuição, da densidade e do ruído de fase dos pontos PS.

A fim de obter medidas confiáveis, somente pontos com uma relação sinal/ruído boa são considerados. A avaliação de qualidade dos PSs é baseada na análise de suas informações de fase e amplitude ao longo do tempo e suas propriedades relativas. A capacidade de distinguir entre PS e não PS aumenta com o número de imagens disponíveis e com o período de tempo analisado. Na verdade, o aumento do número de imagens permite usar limiares menores no critério de seleção dos PSs e assim obter uma melhor capacidade de detecção mantendo-se estável a taxa de alarmes falsos. Por outro lado, reduzir o número de imagens requer o uso de limiares maiores, com uma piora na densidade e distribuição dos PSs.

A análise de referência ascendente realizada foi baseada em 60 imagens SAR COSMO-SkyMed adquiridas de Abril de 2016 a Dezembro de 2018. As medidas de deformação se referem à primeira data do *stack* de imagens e um ponto de referência (Figura 16) escolhido entre os PSs selecionados.



Figura 16 - O Polígono vermelho identifica a área de interesse e a estrela amarela identifica a zona onde o ponto de referência foi selecionado para as medidas PSP-IFSAR.

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 23 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

5.2 Medidas PSP-IFSAR: geometria ascendente

5.2.1 Dados de Entrada

A tabela a seguir apresenta a lista das Imagens COSMO-SkyMed adquiridas em geometria ascendente e usadas na análise de referência PSP-IFSAR e os parâmetros associados: componente de linha de base interferométrica ortogonal à linha de visada do sensor (Bn) e linha de base temporal (Bt).

A letra M é usada para identificar a imagem-mestre (todas as imagens SAR estão reportadas no mesmo grid da imagem-mestre).

Id	Data	Satélite	Beam	Bn [metros]	Bt [dias]
1	05/04/2016	CSKS4	HI-OB	964,948198	-428
2	17/04/2016	CSKS2	HI-OB	1029,653868	-416
3	07/05/2016	CSKS4	HI-OB	1151,909689	-396
4	19/05/2016	CSKS2	HI-OB	562,212878	-384
5	08/06/2016	CSKS4	HI-OB	-227,05993	-364
6	24/06/2016	CSKS4	HI-OB	-916,817215	-348
7	10/07/2016	CSKS4	HI-OB	892,030429	-332
8	26/07/2016	CSKS4	HI-OB	-34,166306	-316
9	11/08/2016	CSKS4	HI-OB	-252,478025	-300
10	27/08/2016	CSKS4	HI-OB	133,18251	-284
11	12/09/2016	CSKS4	HI-OB	-739,452561	-268
12	28/09/2016	CSKS4	HI-OB	635,720162	-252
13	10/10/2016	CSKS2	HI-OB	614,907268	-240
14	30/10/2016	CSKS4	HI-OB	922,505223	-220
15	11/11/2016	CSKS2	HI-OB	1253,578507	-208
16	01/12/2016	CSKS4	HI-OB	472,049043	-188
17	17/12/2016	CSKS4	HI-OB	-423,863043	-172
18	02/01/2017	CSKS4	HI-OB	777,252976	-156
19	18/01/2017	CSKS4	HI-OB	599,451145	-140
20	03/02/2017	CSKS4	HI-OB	-90,470733	-124
21	19/02/2017	CSKS4	HI-OB	783,160185	-108
22	07/03/2017	CSKS4	HI-OB	101,460426	-92
23	19/03/2017	CSKS2	HI-OB	407,684451	-80
24	04/04/2017	CSKS2	HI-OB	-799,020477	-64
25	24/04/2017	CSKS4	HI-OB	-154,376535	-44
26	06/05/2017	CSKS2	HI-OB	-26,286171	-32
27	26/05/2017	CSKS4	HI-OB	1069,002176	-12
28 (M)	07/06/2017	CSKS2	HI-OB	0	0
29	27/06/2017	CSKS4	HI-OB	-889,159149	20
30	13/07/2017	CSKS4	HI-OB	350,959578	36
31	29/07/2017	CSKS4	HI-OB	499,871471	52

32	14/08/2017	CSKS4	HI-OB	-353,014424	68
33	30/08/2017	CSKS4	HI-OB	-745,326318	84
34	15/09/2017	CSKS4	HI-OB	-453,368857	100
35	01/10/2017	CSKS4	HI-OB	-638,798937	116
36	17/10/2017	CSKS4	HI-OB	-68,068651	132
37	02/11/2017	CSKS4	HI-OB	-989,150193	148
38	18/11/2017	CSKS4	HI-OB	229,969874	164
39	30/11/2017	CSKS2	HI-OB	-593,399287	176
40	16/12/2017	CSKS2	HI-OB	-400,464169	192
41	05/01/2018	CSKS4	HI-OB	-1226,89487	212
42	21/01/2018	CSKS4	HI-OB	208,346473	228
43	06/02/2018	CSKS4	HI-OB	591,088119	244
44	10/02/2018	CSKS1	HI-OB	-579,474925	248
45	10/03/2018	CSKS4	HI-OB	-1340,02401	276
46	26/03/2018	CSKS4	HI-OB	152,283059	292
47	11/04/2018	CSKS4	HI-OB	531,375282	308
48	27/04/2018	CSKS4	HI-OB	-152,21524	324
49	13/05/2018	CSKS4	HI-OB	-986,772899	340
50	14/06/2018	CSKS4	HI-OB	487,274191	372
51	16/07/2018	CSKS4	HI-OB	-1239,00567	404
52	01/08/2018	CSKS4	HI-OB	-19,863649	420
53	17/08/2018	CSKS4	HI-OB	54,589741	436
54	06/09/2018	CSKS1	HI-OB	-248,818209	456
55	18/09/2018	CSKS4	HI-OB	-5,71098	468
56	04/10/2018	CSKS4	HI-OB	-377,43374	484
57	20/10/2018	CSKS4	HI-OB	729,816757	500
58	05/11/2018	CSKS4	HI-OB	994,490274	516
59	21/11/2018	CSKS4	HI-OB	964,762693	532
60	07/12/2018	CSKS4	HI-OB	259,589046	548

5.2.2 Informações de Processamento

Nesta seção a informação principal diz respeito ao processamento dos dados COSMO-SkyMed em órbita ascendente.

Nome da Área	Maceió, Brasil
Tamanho da Área (km²)	33,94
Data da Entrega	08/02/2019
Versão do Software	3.1
Análise	PSP-IFSAR
Satélites	COSMO-SkyMed
Geometria de Aquisição	ASCENDENTE

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 25 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

Número de Imagens	60
Período Analisado	05/04/2016 - 07/12/2018
Horário UTC de Aquisição da Imagem-Mestre [h]	08:22:18

As medidas de deslocamentos PS são relevantes às datas de referência e ao ponto de referência. A primeira data de aquisição disponível (05/04/2016) foi selecionada como data de referência. O ponto de referência foi selecionado entre os PSs mais confiáveis sob a hipótese de que a maioria dos PSs foi estável.

Os dados foram projetados para o sistema de referência Geográfico (Lat./Long.) e Datum WGS84.

A tabela a seguir apresenta algumas informações relevantes sobre o sistema de referência, o ponto de referência e algumas estatísticas sobre a densidade dos PSs.

Sistema de Referência	Geográfica/WGS84
Código do Ponto de Referência	08C9C6
Hipótese do Ponto de Referência	Sem movimentação/Estável
Número de PSs	1123173
Densidade Média de PS (PS/km²)	33093
Referência para localização absoluta do PS	Ortoimagens disponíveis no Google Earth sobre a AOI

A medida de deslocamento do PS refere-se à projeção do deslocamento atual ao longo da linha de visada do sensor SAR (LOS). Na tabela abaixo são apresentadas as informações sobre o vetor cosseno na direção LOS relativo à geometria ascendente. Como se pode observar nos valores apresentados, o SAR é praticamente insensível aos movimentos na direção Norte-Sul (N), enquanto é sensível aos movimentos na direção Leste-Oeste (E) e particularmente sensível aos movimentos verticais (direção H).

Cosseno na direção LOS – Line Of Sight (Geometria Ascendente)	Norte: -0,088540681429	Leste: -0,3958406622	Vertical: 0,9140408732
--	------------------------	----------------------	------------------------

<i>Objeto:</i> Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	<i>Rev</i> 00	<i>Data</i> 13/02/2019	<i>Anexos</i> 00	<i>Pág.</i> 26 de 30
---	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

6. Resultados

6.1 Resultados das Análises PSP-IFSAR Ascendente

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelo processamento dos dados SAR COSMO-SkyMed HImage ascendente (60 imagens), referentes ao período de Abril de 2016 a Dezembro de 2018. A Figura 17 apresenta uma visão global das velocidades médias relevantes referentes à geometria descende. Os valores da velocidade estão representados numa escala de cores que varia do azul para o vermelho, de acordo com a legenda no canto inferior direito da imagem.

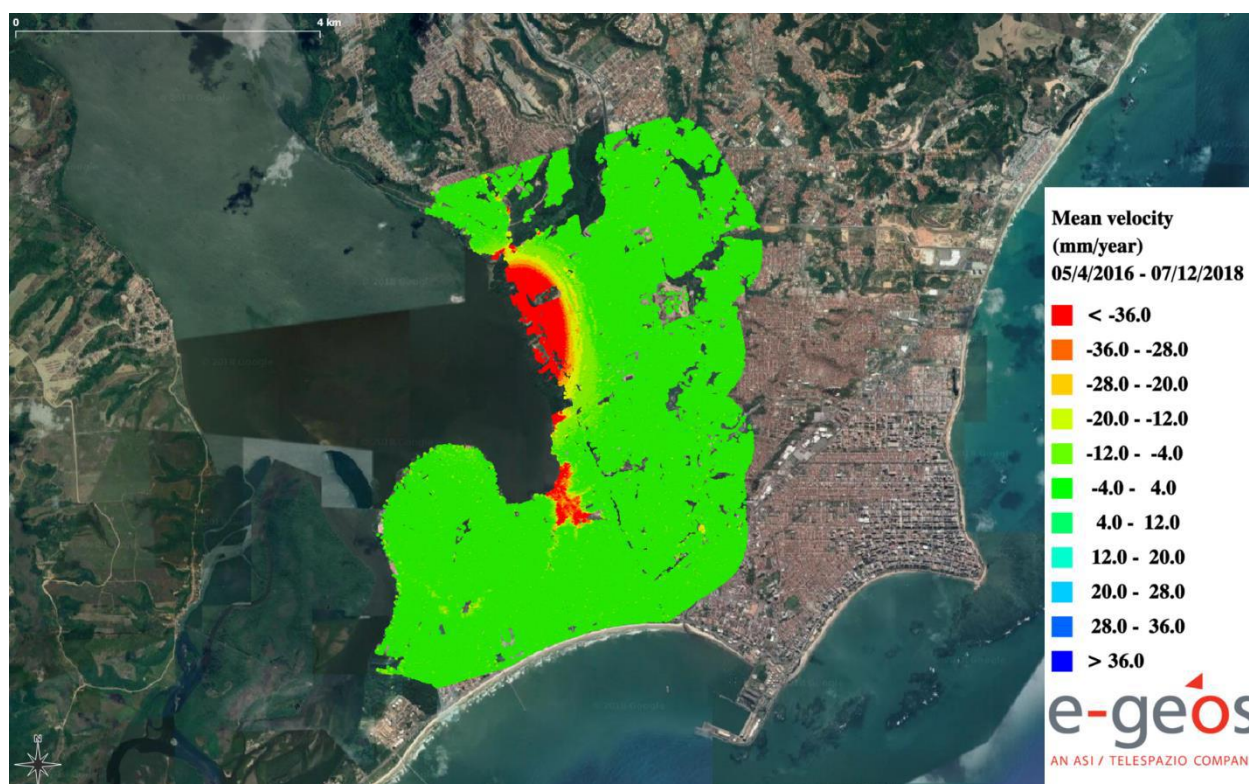
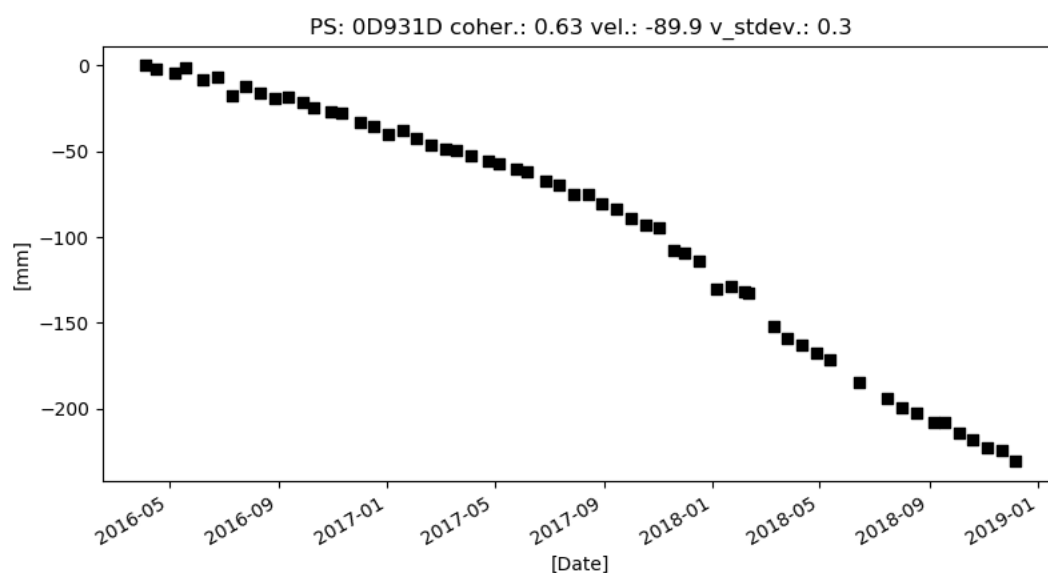
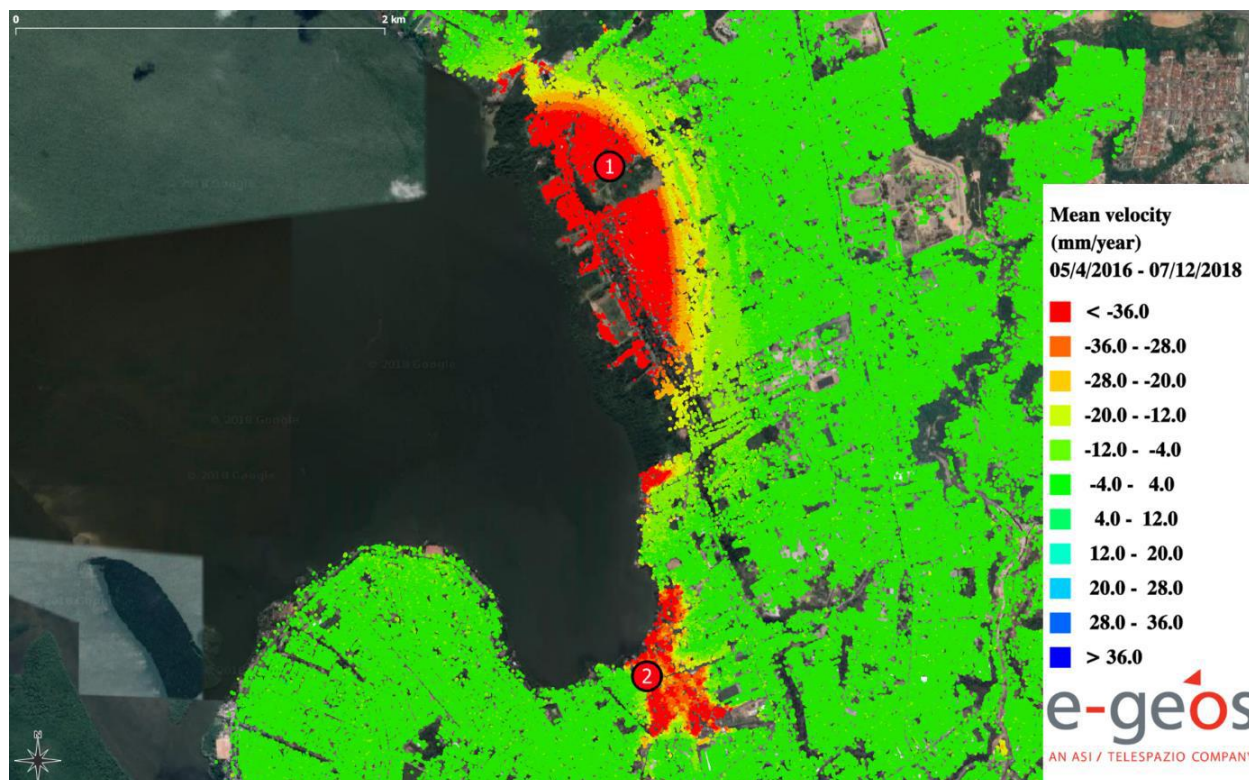


Figura 17: Mapas de velocidades médias relevantes em geometria ascendente referente ao período de Abril de 2016 a Dezembro de 2018. O *stack* ascendente é constituído por 60 imagens SAR COSMO-SkyMed HImage, sobre uma área da cidade de Maceió, Brasil. As medidas de PS estão sobrepostas sobre uma imagem óptica do Google Earth.

A Figura 17 demonstra que existe uma grande região com valores significativos de velocidade média na porção leste da Lagoa Mundaú, em particular nos bairros de Pinheiro, Bom Parto e Levada, com deslocamentos superiores a 7,0 cm/ano.

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 27 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	------------------

Uma visão em detalhe na área com deformações significativas do mapa de velocidade média é apresentada na Figura 18 em conjunto com os gráficos das evoluções temporais de dois PS selecionados para os bairros de Pinheiro e Levada.



Objeto:	Rev	Data	Anexos	Pág.
Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	00	13/02/2019	00	28 de 30

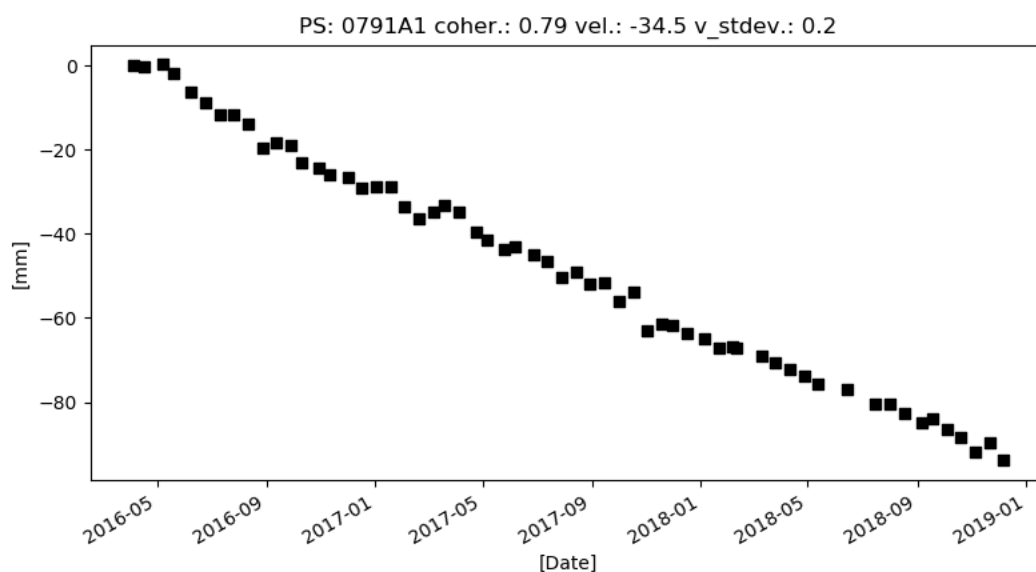


Figura 18 – Uma visão em detalhe do mapa anterior, com foco nos bairros de Pinheiro e Levada. Dois PSs com movimentos significativos estão identificados por círculos pretos. Os dois gráficos mostram as evoluções do deslocamento temporal dos dois pontos selecionados (de cima para baixo: ponto n.1, ponto n.2).

Objeto: Análise de Deformação de Terreno – Relatório de Análise de Referência PSP-IFSAR	Rev 00	Data 13/02/2019	Anexos 00	Pág. 29 de 30
--	-----------	--------------------	--------------	------------------