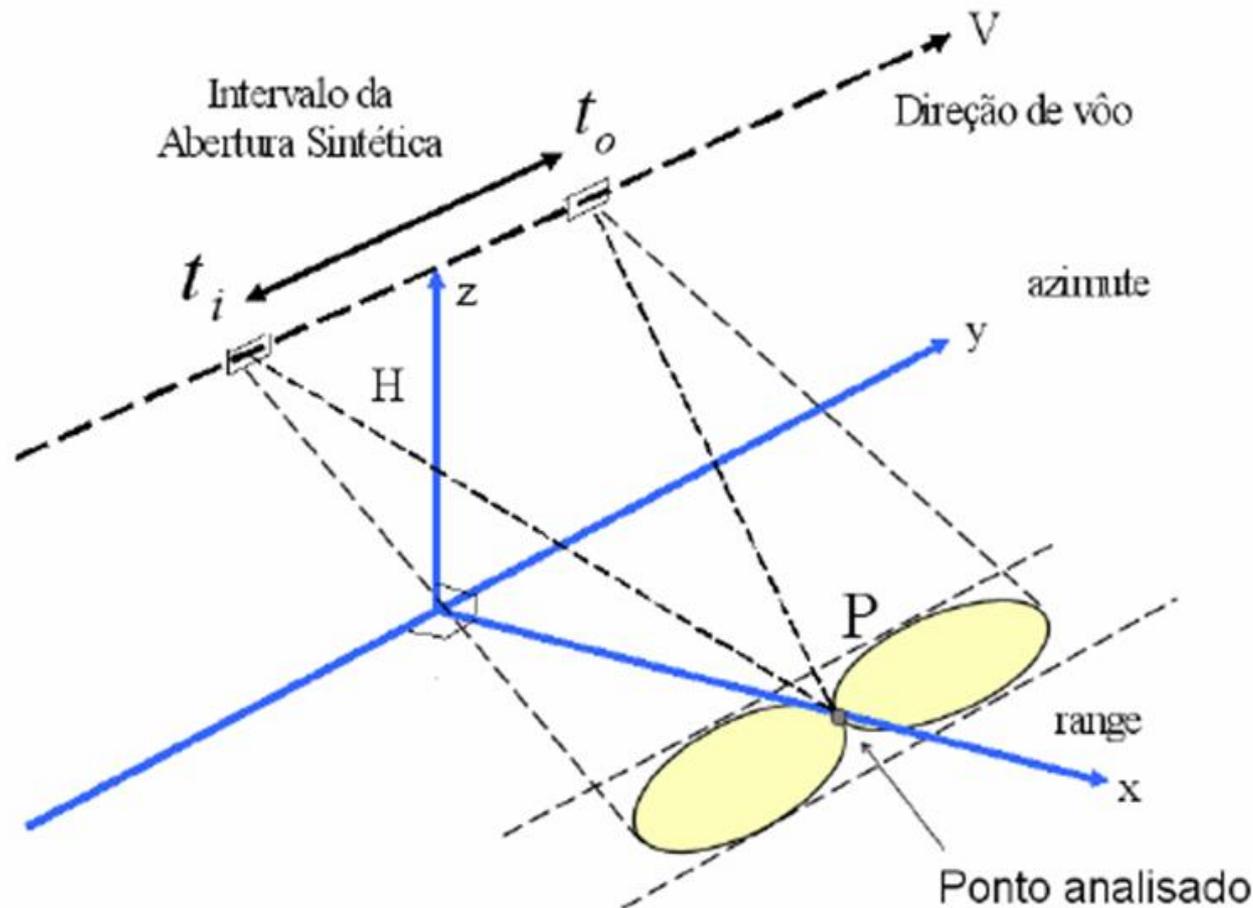


Monitoramento de deformação sísmica usando interferometria diferencial D-InSAR

O que são imagens SAR?

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Radar de Abertura Sintética (SAR)

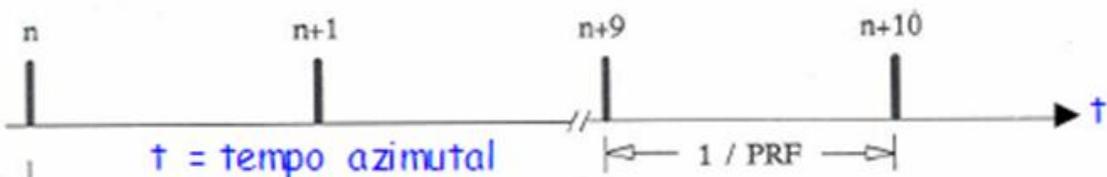


-A abertura sintética está relacionada ao intervalo de tempo em que o sensor radar recebe ecos de um determinado ponto no solo, na área imageada.

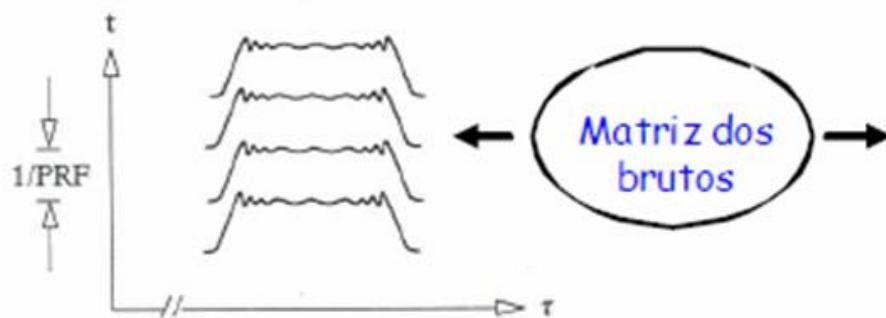
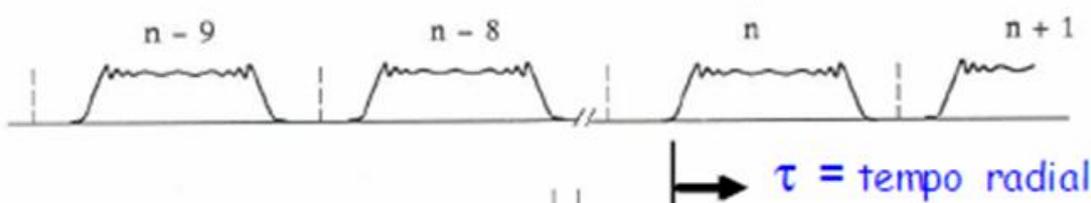
SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Aquisição dos dados SAR

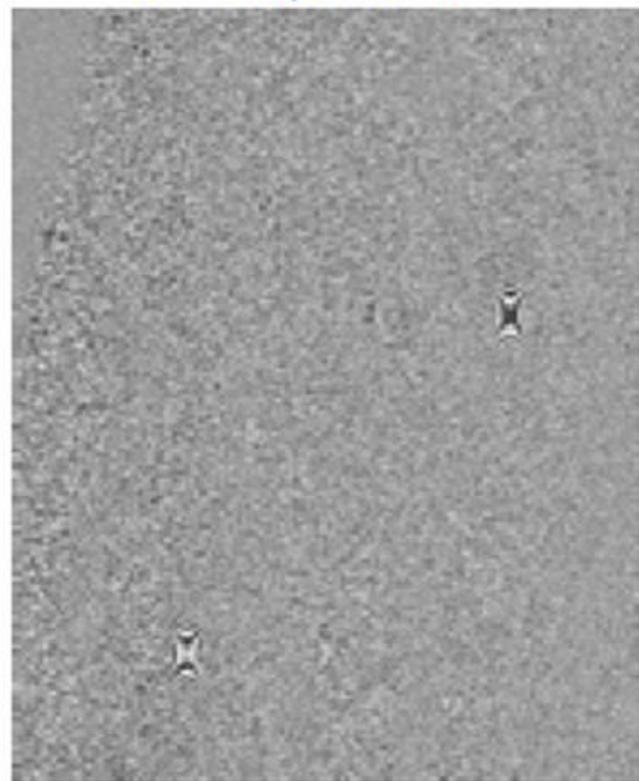
Pulsos transmitidos



Ecos recebidos



$\tau = \text{tempo radial}$

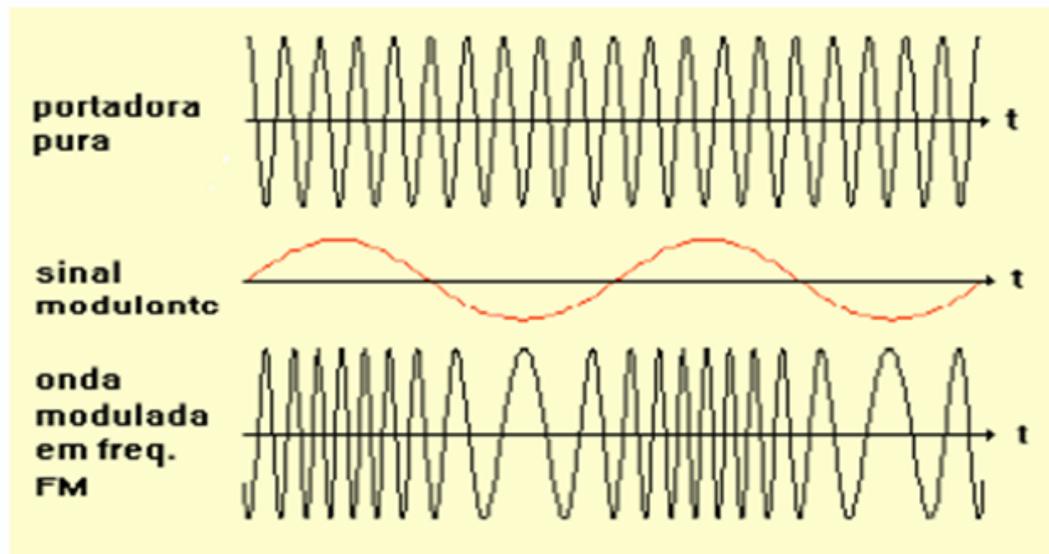


Dados brutos (Orbisat-1 - Banda X)

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Conceitos básicos

Modulação por Frequência (FM):



Em sensoriamento remoto por radar, a portadora pode estar nas frequências típicas:

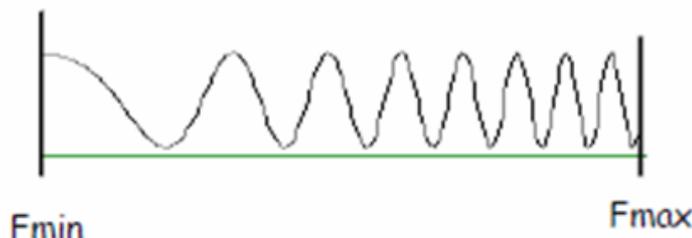
9 GHz - Banda X

5 GHz - Banda C

1.23 GHz - Banda L

0.4 GHz - Banda P

No caso de radar o signal modulante é conhecido como "chirp":

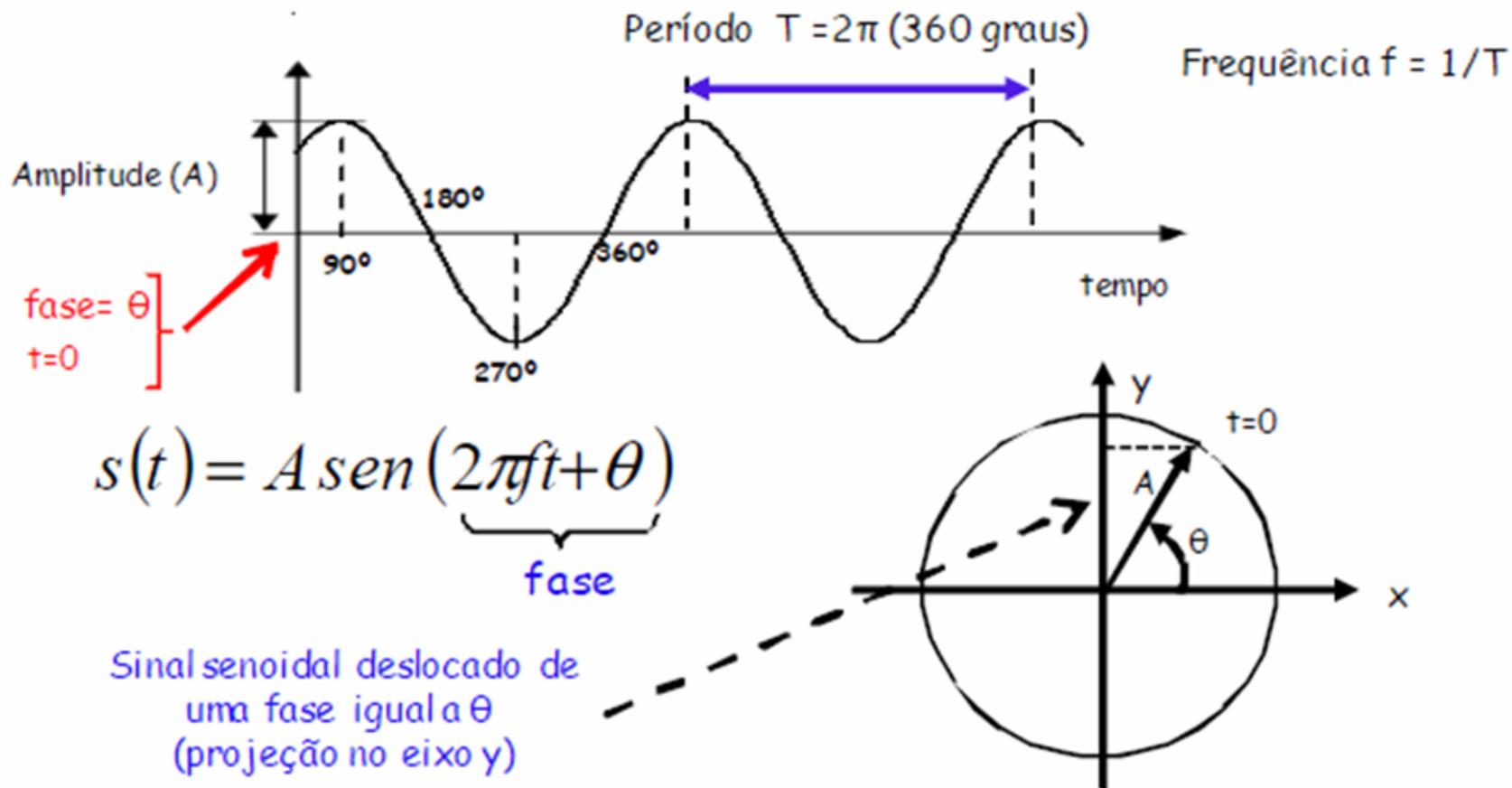


Largura de banda típica de um sinal "chirp" para a banda X: 100 MHz.

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Conceitos básicos

Fase de um sinal:



OBS: A fase de um sinal determina sua amplitude em um dado instante de tempo

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

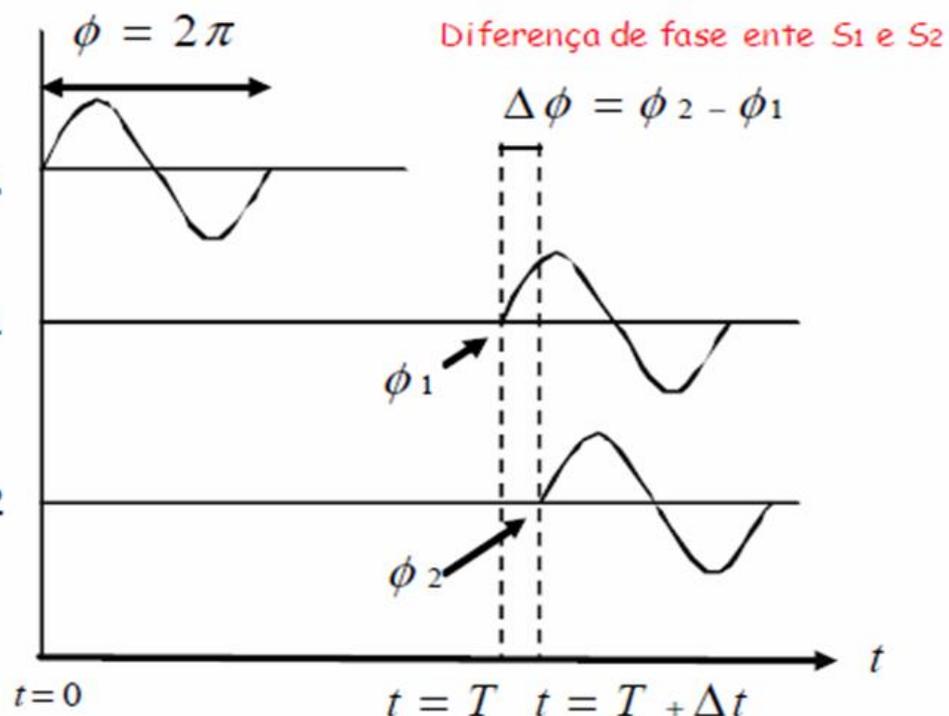
Conceitos básicos

Diferença de fase entre sinais:

$$s(t) = A \operatorname{sen}(2\pi f t) \quad \text{---} \rightarrow \text{Ref.}$$

$$\begin{aligned} s_1(t+T) &= A \operatorname{sen}[2\pi f t + 2\pi f T] \quad \text{---} \rightarrow \text{S1} \\ &= A \operatorname{sen}[2\pi f t + \phi_1] \end{aligned}$$

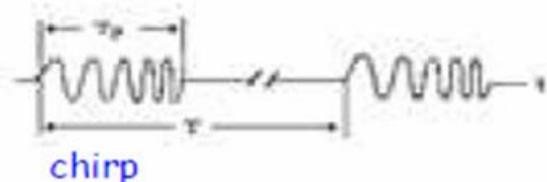
$$\begin{aligned} s_2(t+T+\Delta t) &= A \operatorname{sen}[2\pi f t + 2\pi f (T + \Delta t)] \quad \text{S2} \\ &= A \operatorname{sen}[2\pi f t + \phi_2] \end{aligned}$$



Exemplo de coerência entre sinais (S1 e S2 estão relacionados a um sinal de referência S)

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

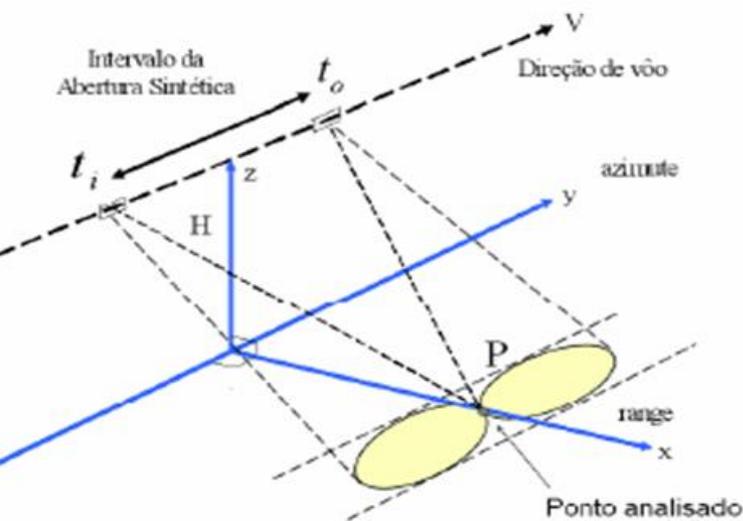
-Um Sistema SAR é baseado em um radar de visada lateral, com coerência temporal de pulso para pulso.



-A discriminação do sinal de retorno na direção perpendicular de vôo (**range**) é obtida através da transmissão de um pulso de microondas estreito, de período T_p , modulado linearmente em frequência e com uma largura de banda B_p ($F_{max} - F_{min}$).

A resolução em range é inversamente proporcional a largura de banda do "chirp" e diretamente proporcional a velocidade da luz:

$$\delta_r = c / 2B_p$$



-A discriminação na direção de vôo (**azimute**) é obtida pela integração coerente do sinal de retorno de um alvo pontual, durante o intervalo de tempo em que este alvo é visto pelo radar (Abertura Sintética).

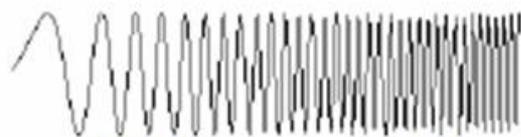
Durante o intervalo da Abertura Sintética o sinal recebido (alvo pontual qualquer) sofre uma variação de frequência, denominada de frequência Doppler, B_D .

A resolução em azimute é inversamente proporcional ao desvio de frequência Doppler e diretamente proporcional a velocidade da plataforma:

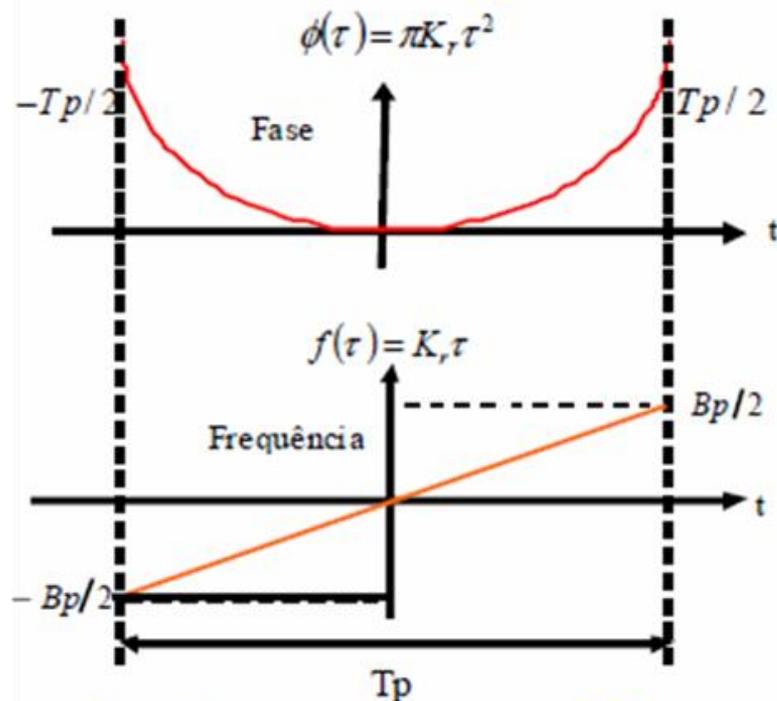
$$\delta_a = V / B_D$$

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Réplicas do Sinal FM em "range" e azimuth



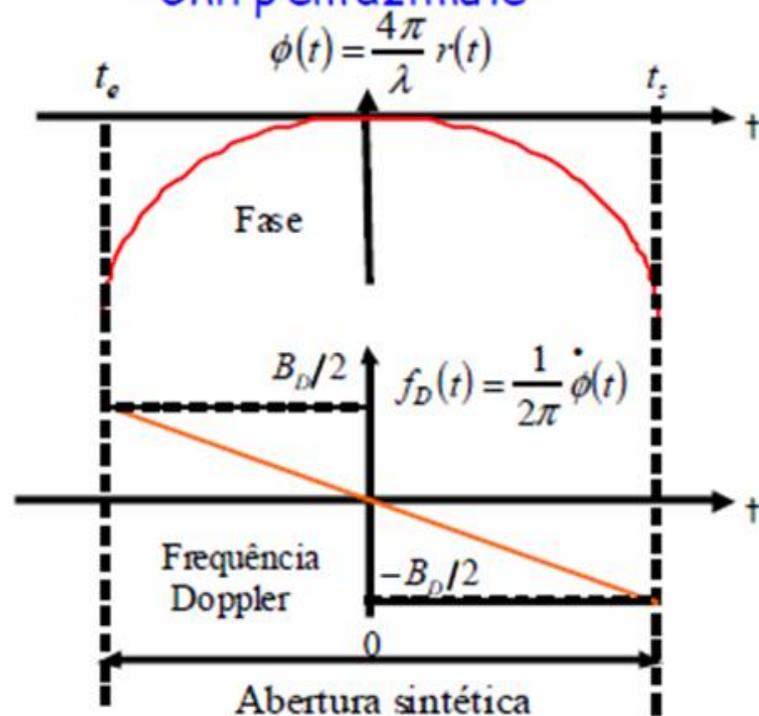
"Chirp em range"



Resolução em range: $c/2Bp$



"Chirp em azimuth"



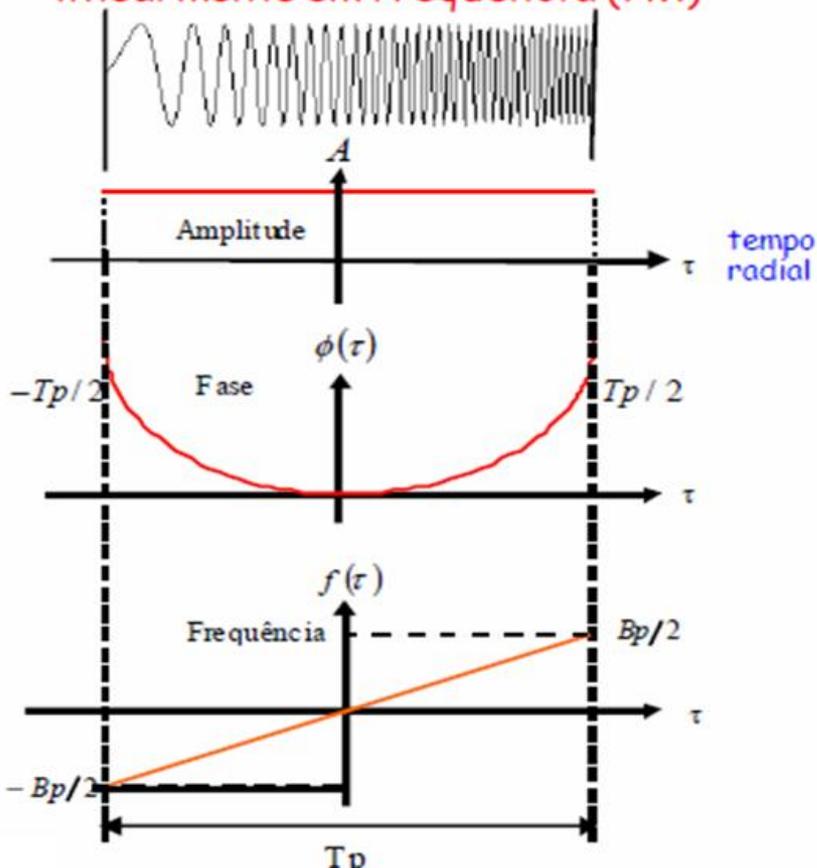
Resolução em azimuth: V/B_D

A largura de banda "chirp" em range é da ordem de dezenas de Megahertz (MH)
A largura de banda "chirp" em azimuth é da ordem de alguns de Kiloherz (KHz)

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Sinal transmitido

O chirp: é um sinal modulado linearmente em frequência (FM)



Equação do chirp:

$$s(t) = \underbrace{A}_{\text{Amplitude}} \cos\left(2\pi \underbrace{f_0}_{\text{Frequência da portadora}} \tau + \pi \underbrace{K_r}_{\text{Fase quadrática}} \tau^2\right)$$

Onde: $|\tau| \leq Tp/2$

Frequência da portadora

Fase quadrática

Fase: $\phi(\tau) = \pi K_r \tau^2$

Frequência base: $f(\tau) = \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} = 2\pi K_r \tau$

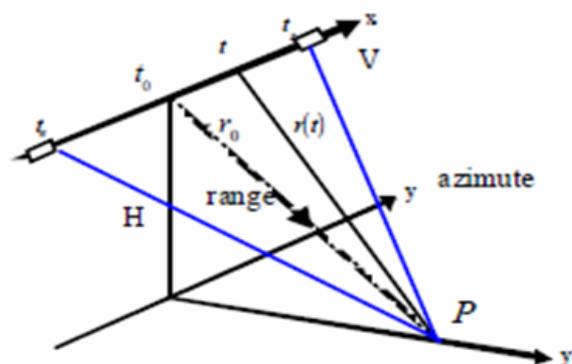
Taxa de variação de frequência: K_r

Largura de banda do chirp: $B_p = K_r * T_p$

Resolução em range = $c/2B_p$

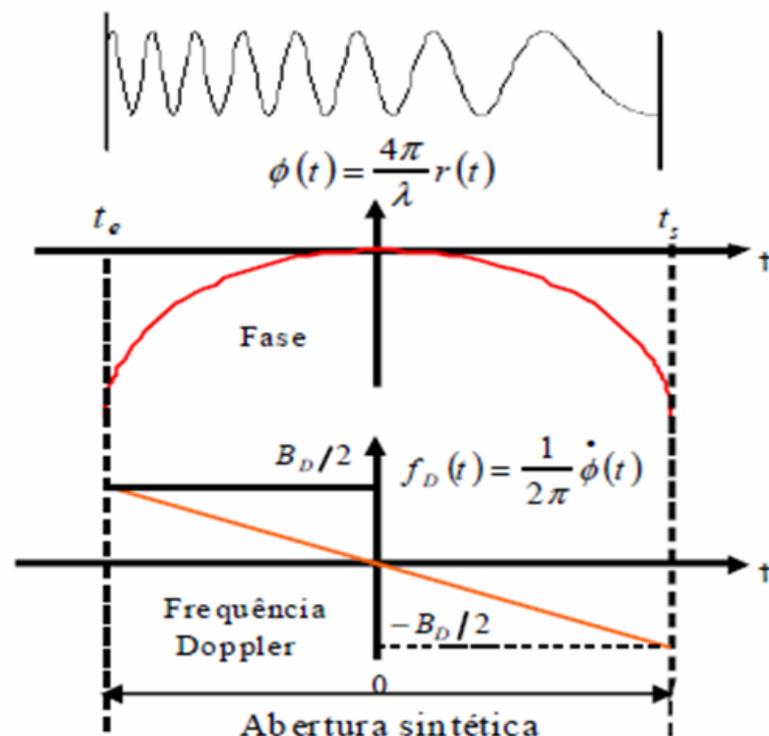
SÍNTESE DE IMAGEM SAR

O sinal SAR - Consideração a respeito do sinal em azimute



- Modulação linear de frequência em azimute, ou variação de frequência Doppler.

- Fase: $\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} r(t) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(r_0 + \frac{(Vt)^2}{2r_0} \right)$
- Frequência Doppler: $f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = \left(\frac{2V^2}{\lambda r_0} \right) t = K_a t$
- Taxa de variação de frequência Doppler: K_a
- Largura de banda em azimute: $B_D = K_a (t_s - t_e)$
- Resolução em azimute: $\rho_a = V / B_D$



SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Compressão na direção de "range": Filtro casado por convolução

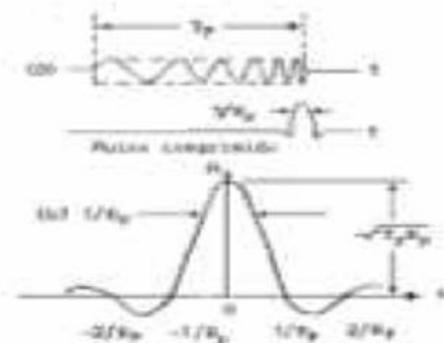
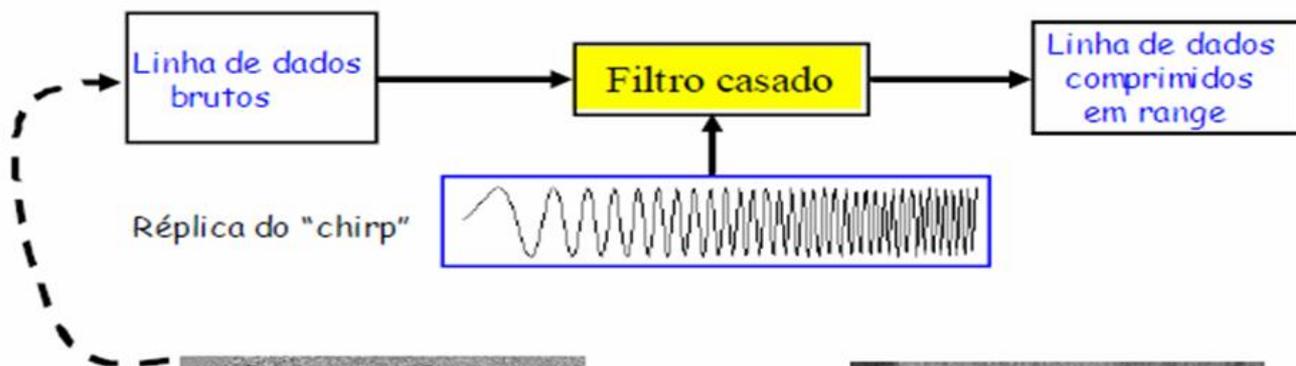


Ilustração do sinal comprimido

Imagem dos dados brutos

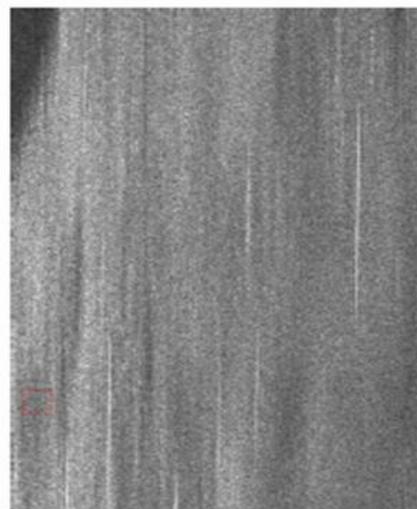
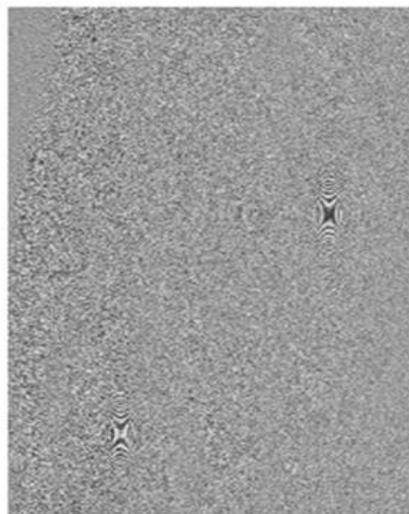


Imagem dos dados após a compressão e correção da migração em range

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Compressão dos dados na direção de azimute: Filtro casado por convolução

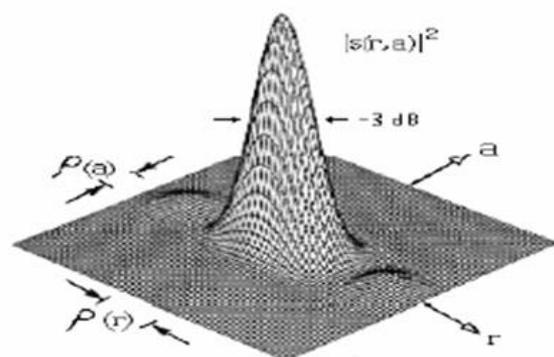
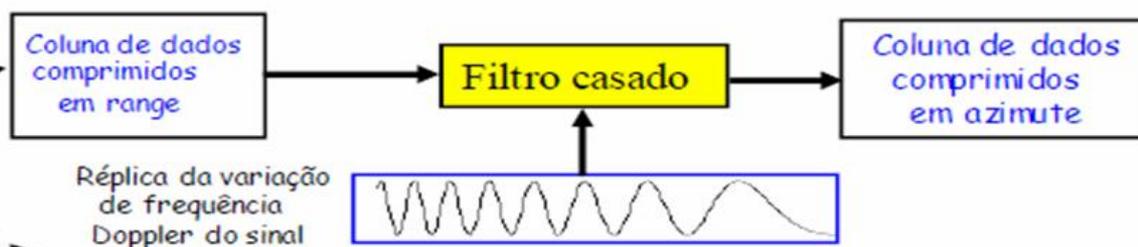


Ilustração de um alvo pontual após compressão de range e azimute

A resolução é definida na metade da potência de pico (-3 dB)

Resolução em range = $c/2B_p$
Resolução em azimute = V/BD

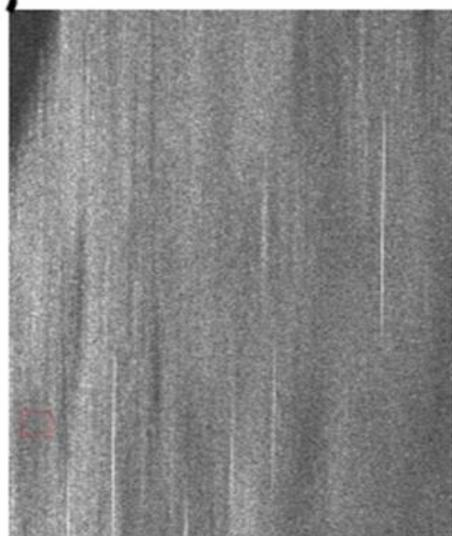


Imagem após a compressão em range

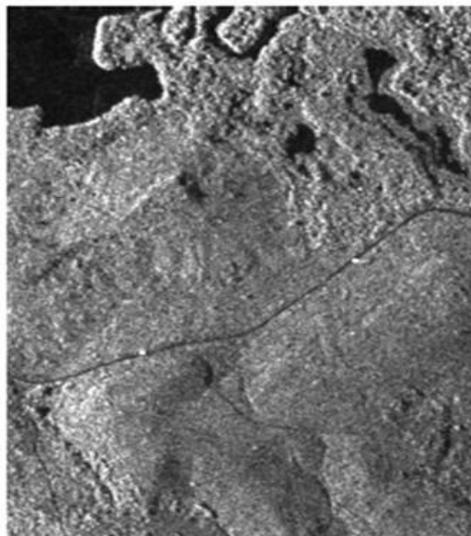
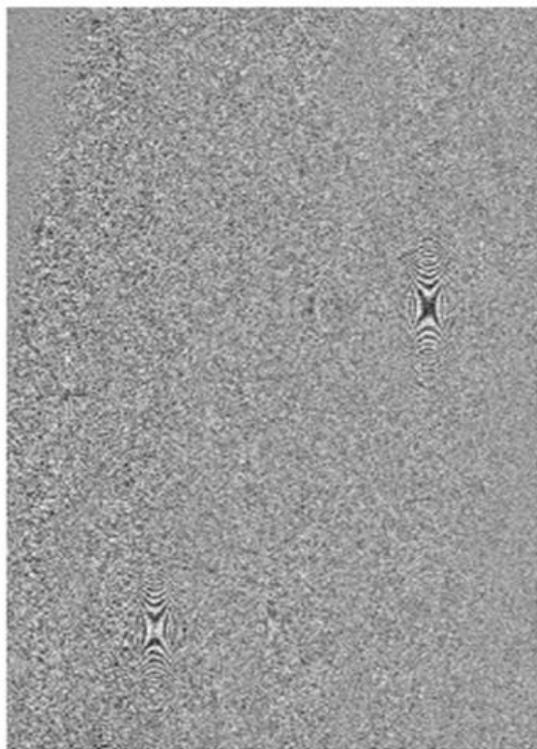


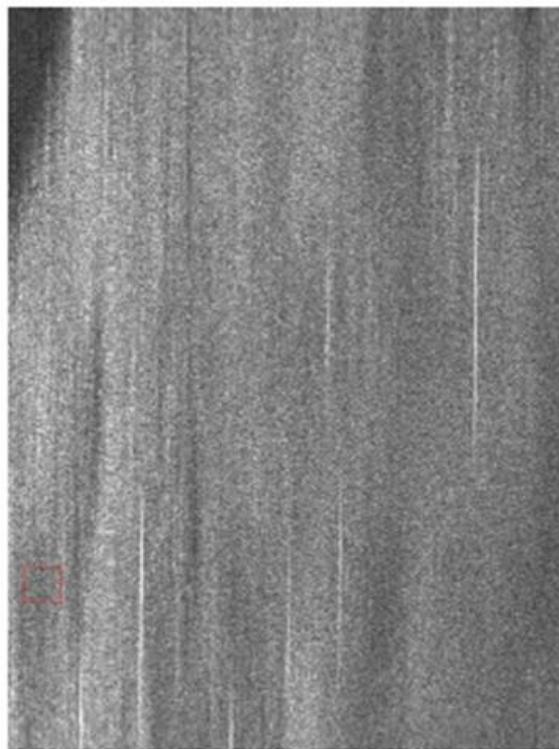
Imagem após a compressão em azimute

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Exemplo dos dados na seqüência dos processamentos



Dados brutos



Dados após a compressão
e correção da migração
em range

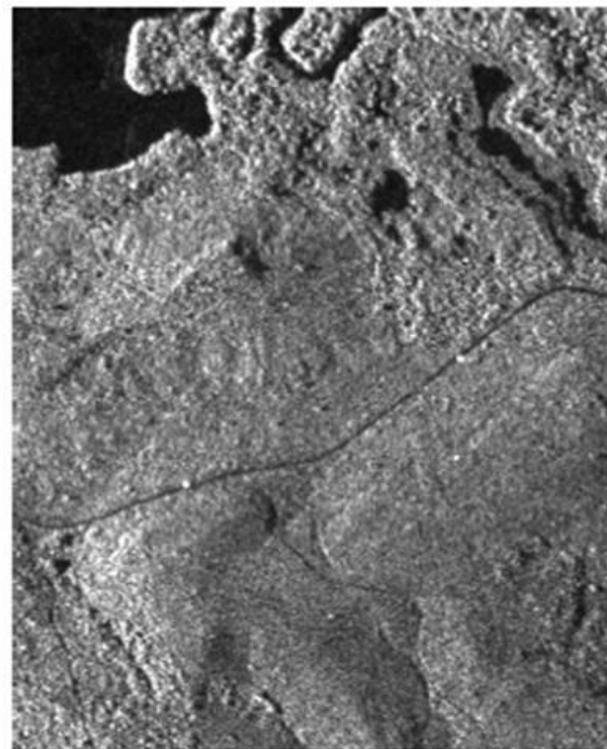
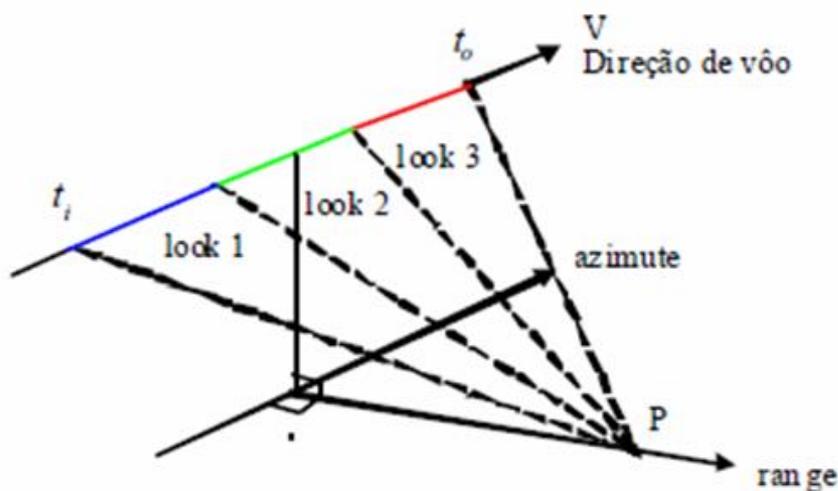


Imagem após a
compressão em azimute

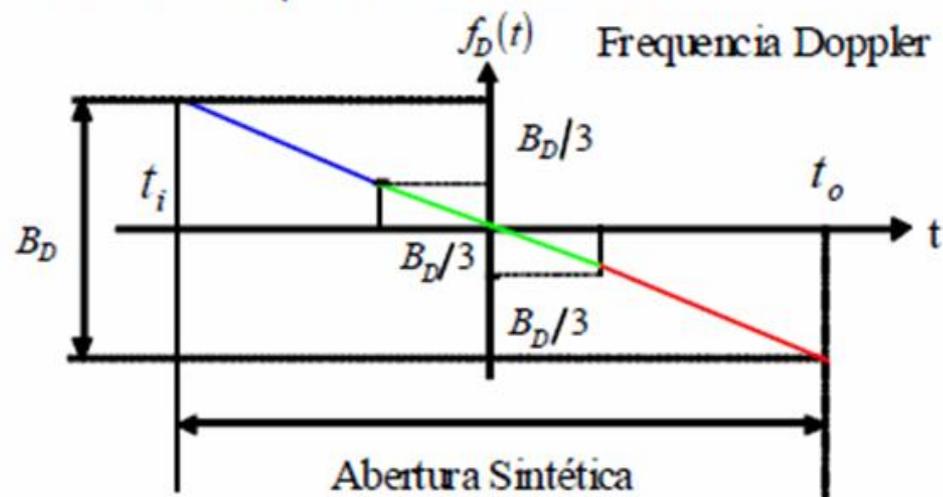
SÍNTESE DE IMAGEM SAR

Técnica Multi-look: Técnica para redução de ruído speckle.

- O intervalo da Abertura Sintética é dividido em sub-intervalos
- Para cada sub-intervalo gera-se uma imagem
- Soma-se as imagens de amplitude de cada intervalo para gerar uma imagem final com nível de ruído speckle atenuado.



Ex: Divisão em 3 looks



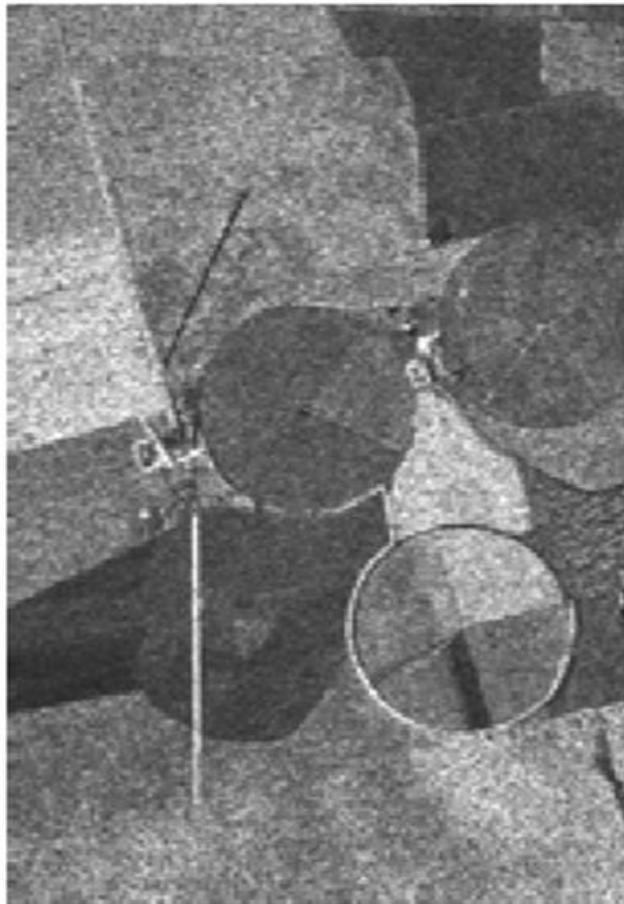
Esta técnica provoca a uma perda na resolução em azimuth:

$$\delta_{aML} = nl \cdot V / B_D$$

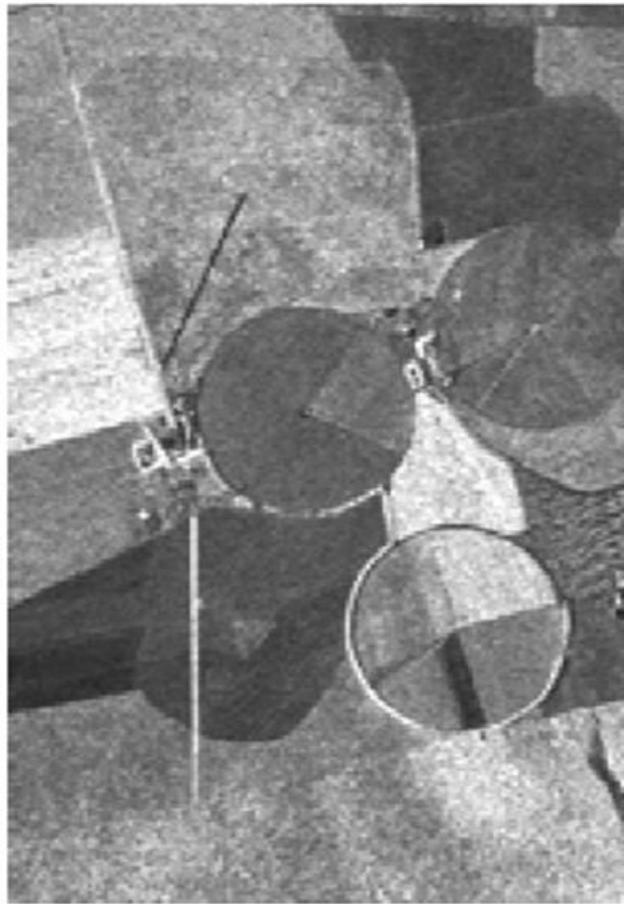
onde nl é o número de looks

SÍNTESE DE IMAGEM SAR

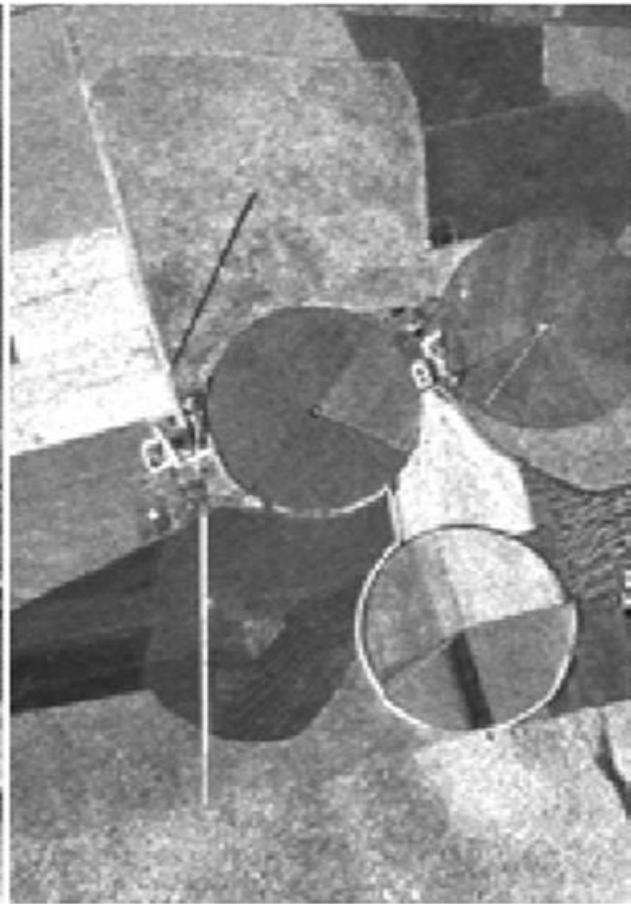
Técnica Multi-look: Técnica para redução de ruído speckle.



1 look



4 looks



8 looks

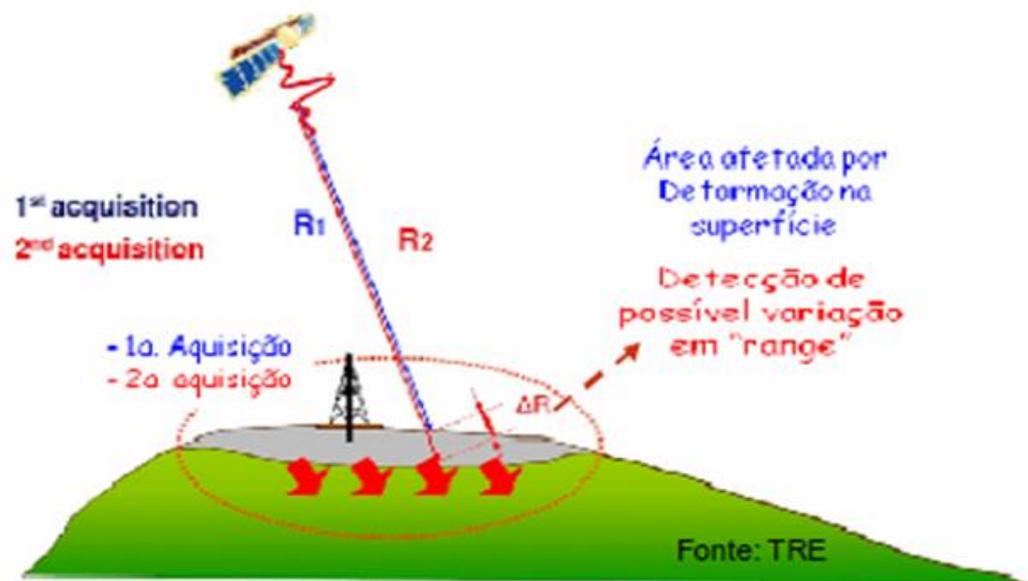
Monitoramento de deformação sísmica usando interferometria diferencial D-Insar

O que interferometria
diferencial D-Insar?

Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

Técnica da Interferometria SAR diferencial:

- Utiliza a informação da diferença de fase interferométrica entre dois pixels de mesma posição no solo, adquiridos em tempos diferentes.
- Associa a diferença de fase a uma deformação superficial.
- Possibilidade de detectar pequenos movimentos:

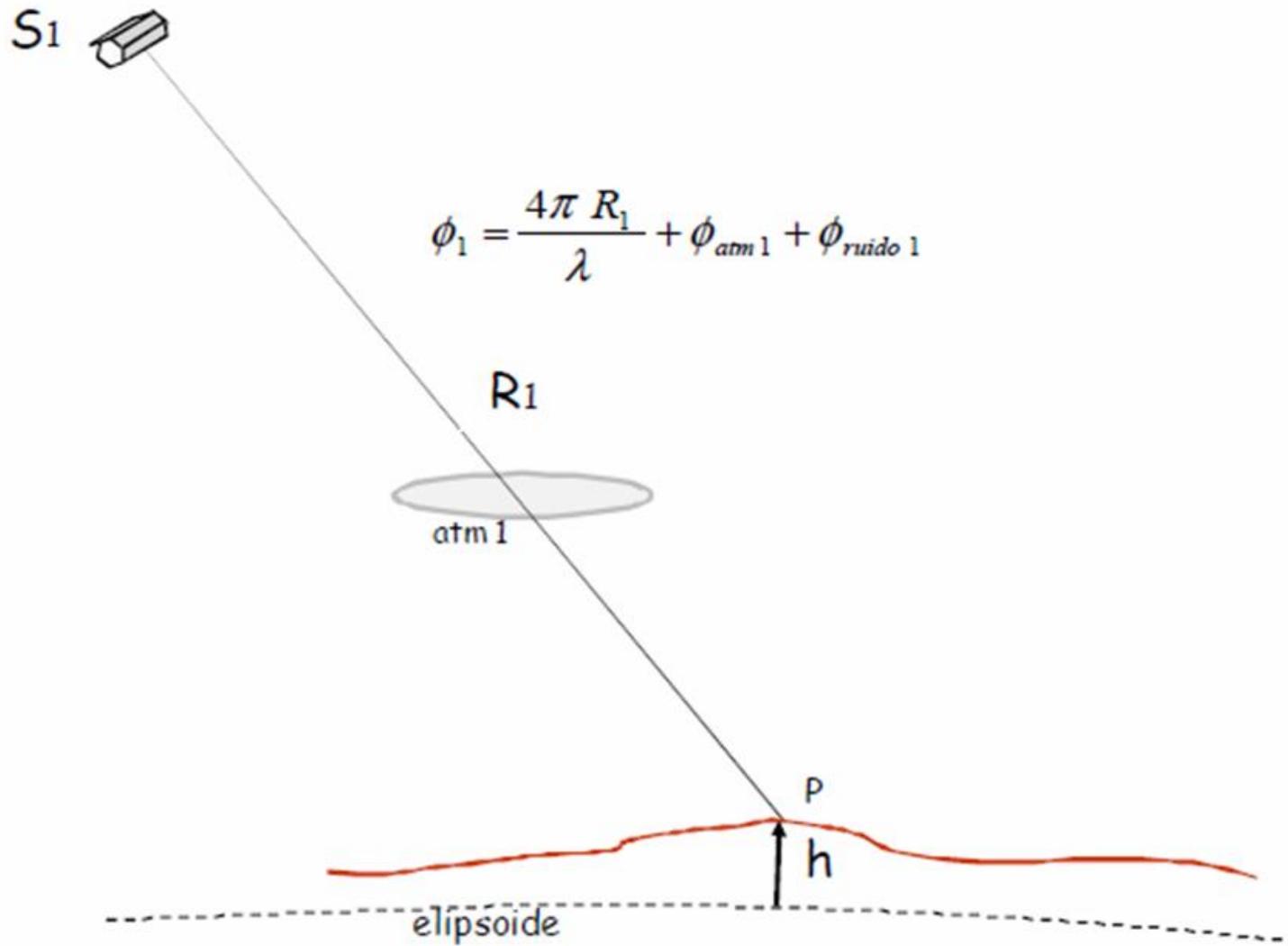


OBS: A técnica DInSAR só é possível em áreas com boa coerência interferométrica espacialmente distribuída (regiões de pouca vegetação, desertos,...)

Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

➤ Fundamentos:

S_1



$$\phi_1 = \frac{4\pi R_1}{\lambda} + \phi_{atm 1} + \phi_{ruído 1}$$

R_1

atm 1

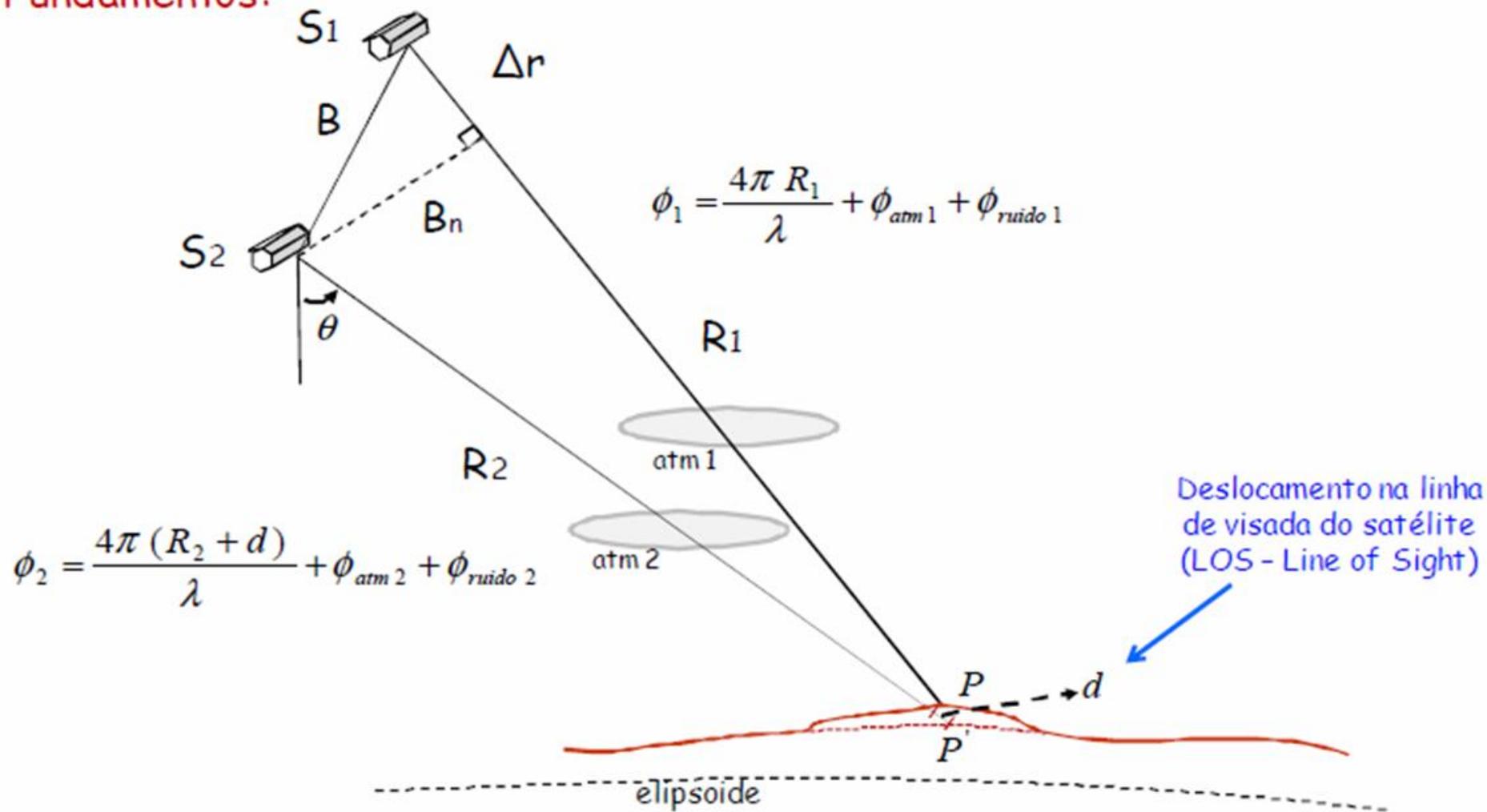
P

h

elipsoide

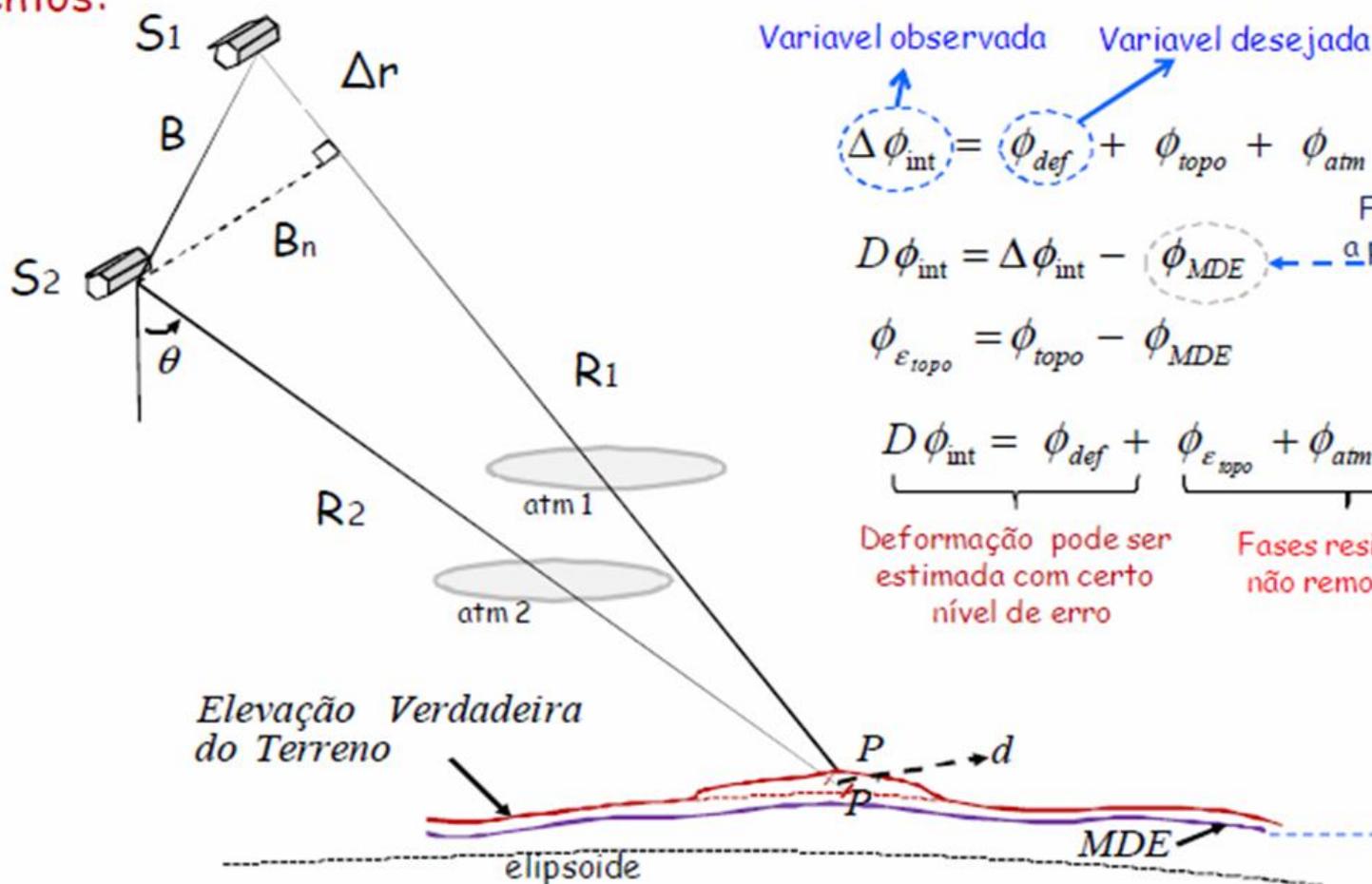
Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

➤ Fundamentos:



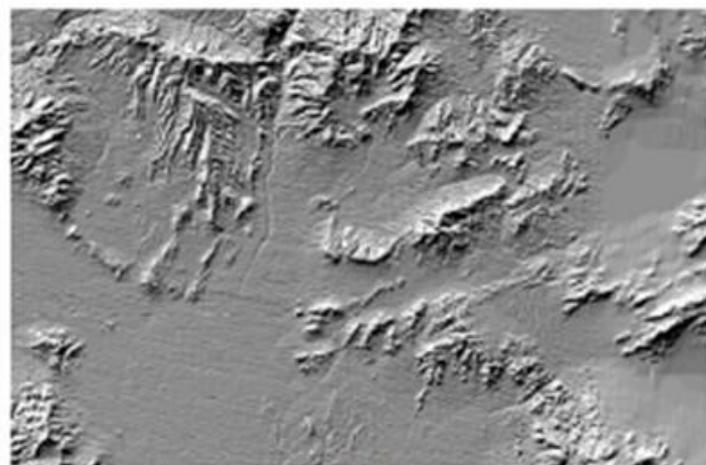
Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

Fundamentos:

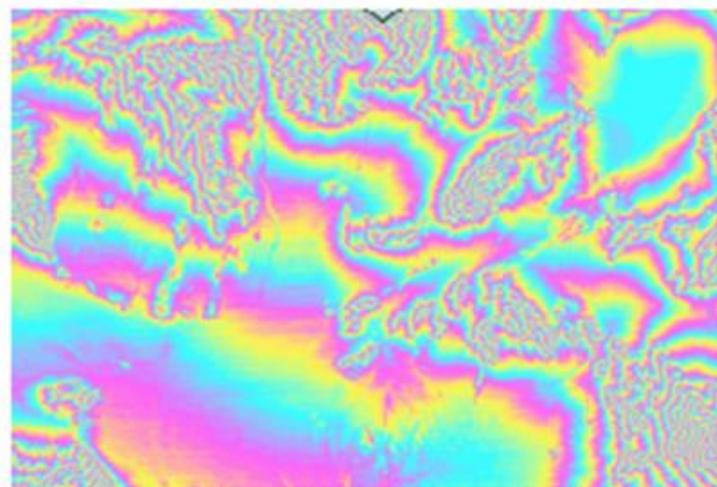
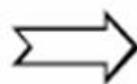


Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

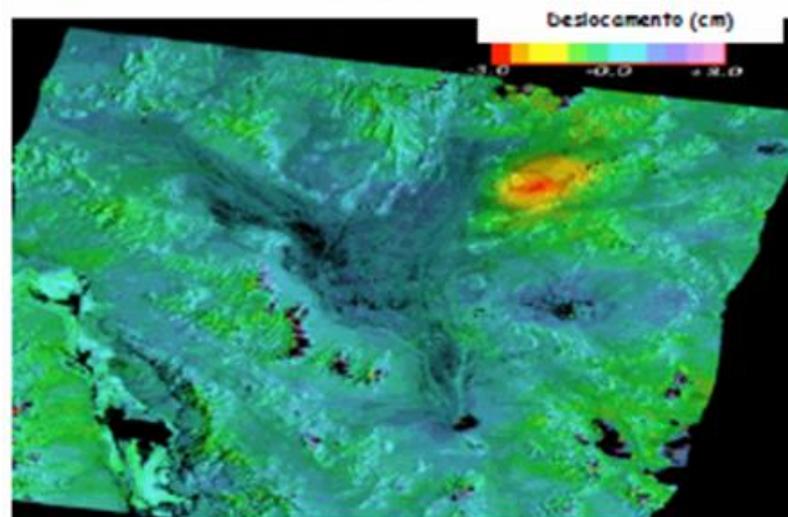
- Interferometria SAR diferencial: utilizando Modelo de Elevação



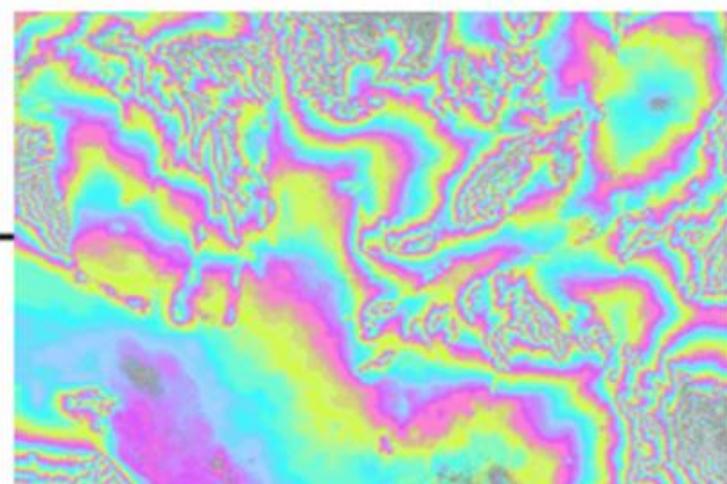
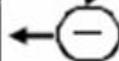
MDE



Interferograma do MDE



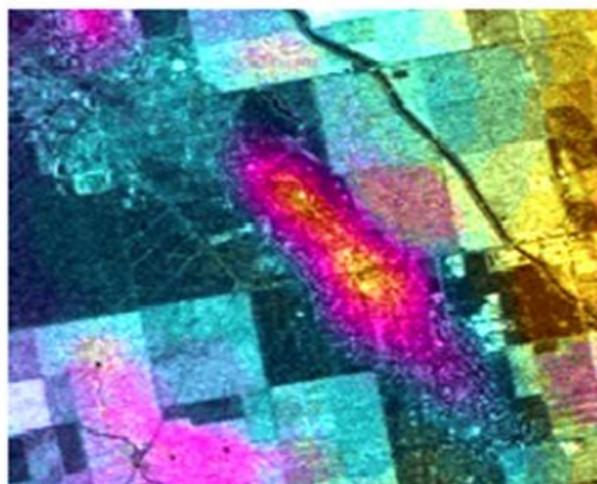
Mapa de deslocamento



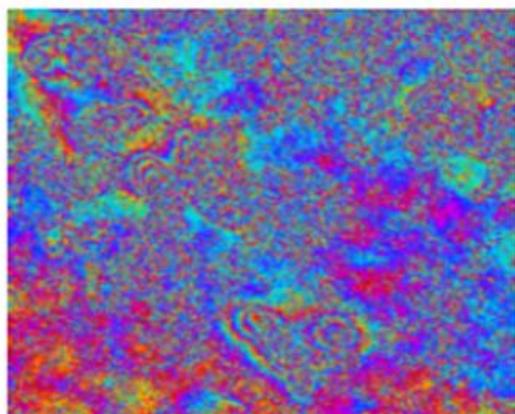
Interferograma InSAR

Interferometria Diferencial de Imagens SAR

Exemplo de erros de fase a ser estimados para determinação precisa da deformação



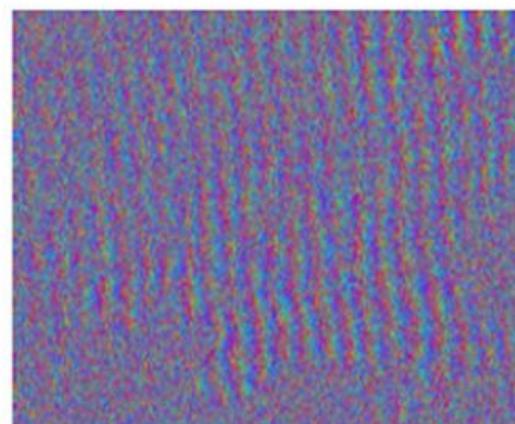
Fase da deformação
(imagem SAR ao fundo)



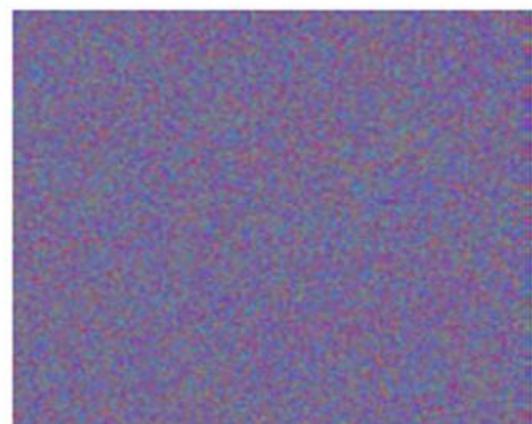
Fase devido ao erros no MDE



Fase devido atmosfera



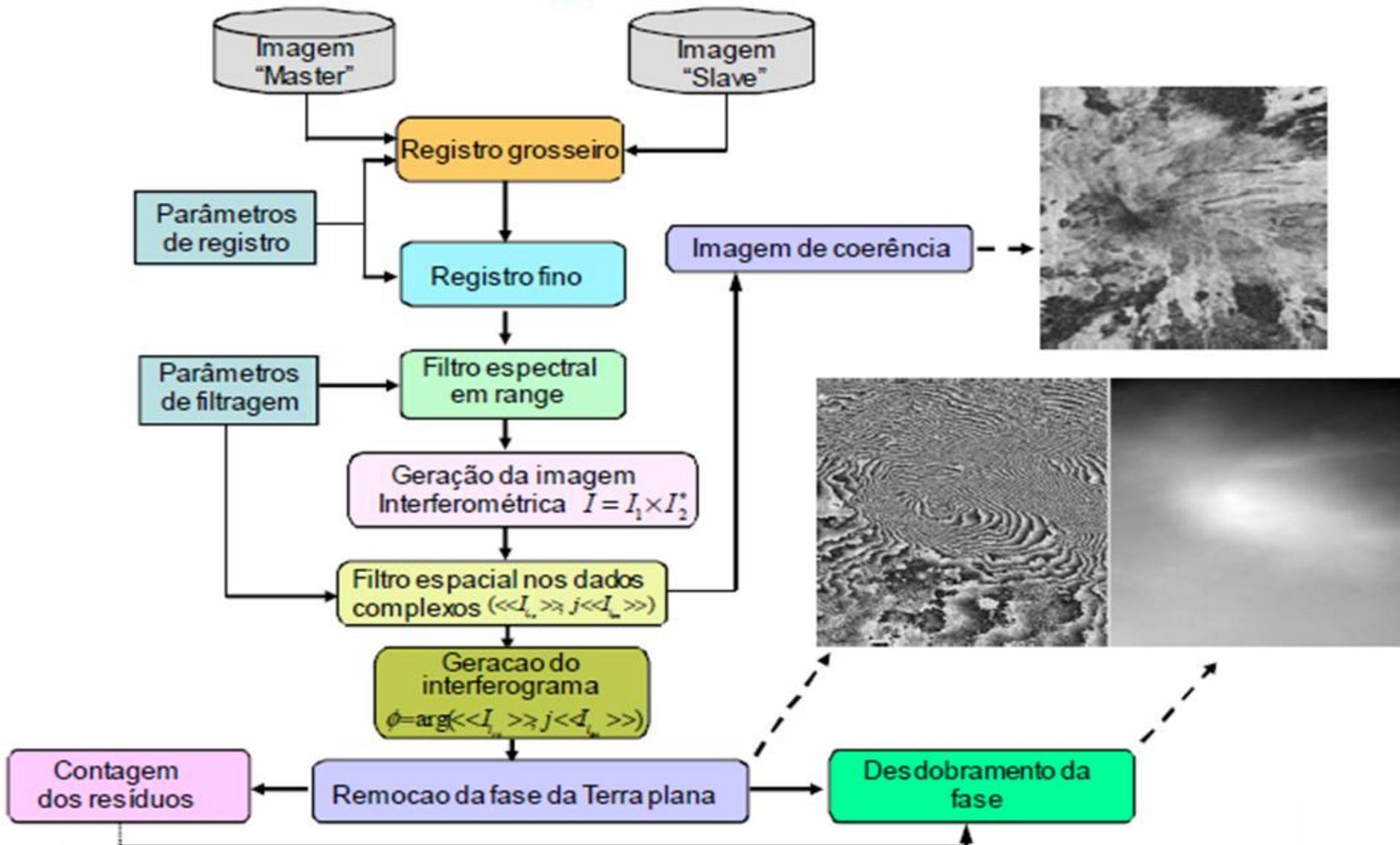
Fase devido a erros de órbita



Fase devido a ruídos

Interferometria de imagens SAR

Processamento de imagens SAR interferométricas



Interferometria de imagens SAR

Geração do Interferograma

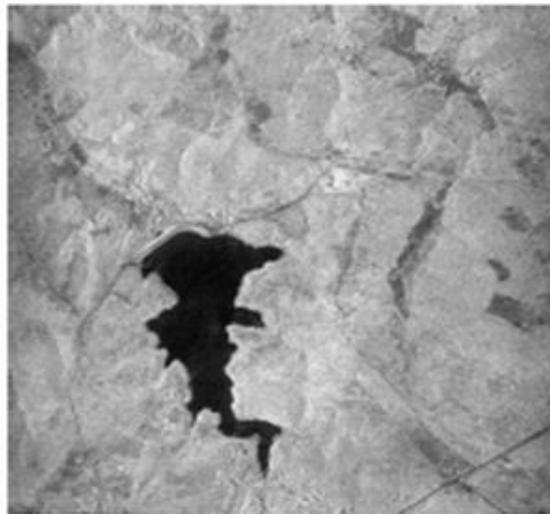


Imagem 1

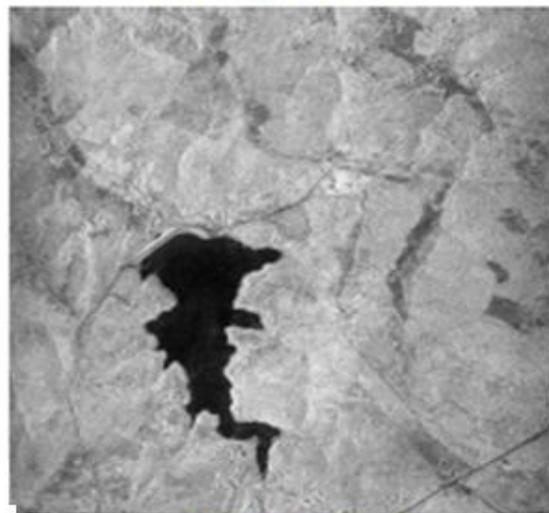
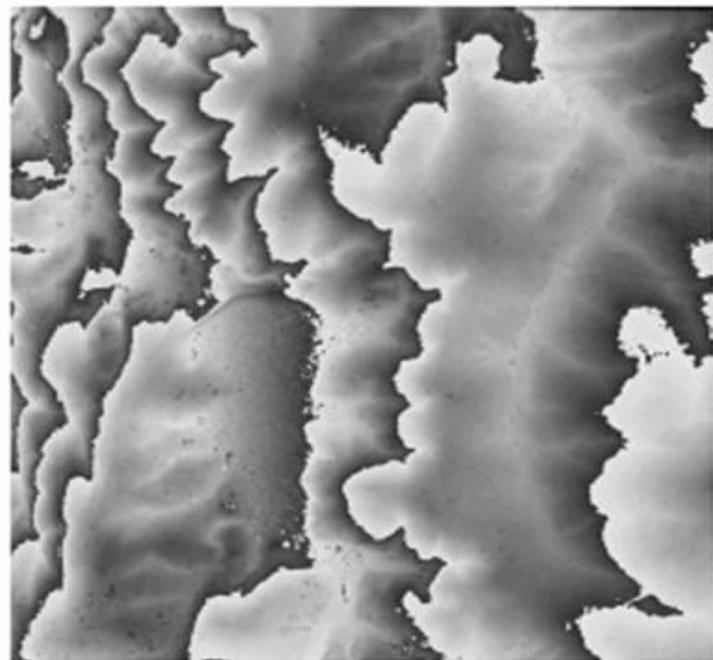


Imagem 2



$$p_{\text{int}} = p_1 \cdot p_2^* = A_1 \cdot A_2 e^{j(\phi_1 - \phi_2)}$$

$$\Delta\phi_p = \arg \cdot p_{\text{int}} = \phi_1 - \phi_2$$

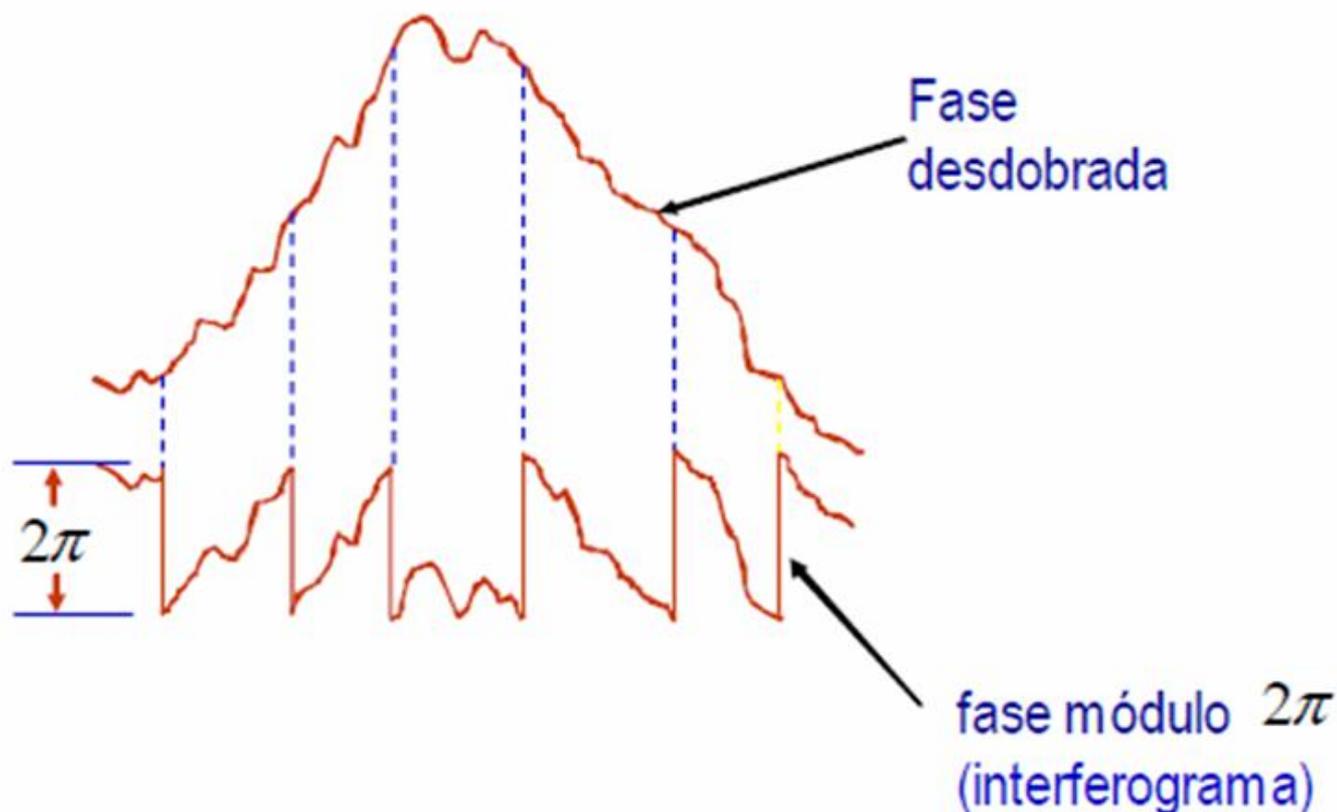


Interferograma (fase módulo 2π)

Característica cíclica da fase

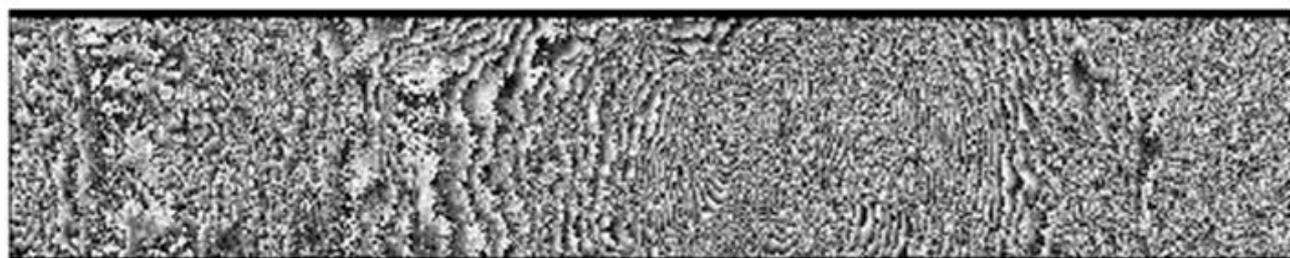
Interferometria de imagens SAR

Desdobramento da fase interferométrica (phase unwrapping)



Interferometria de imagens SAR

Interferograma versus banda utilizada



Banda X ($\lambda \cong 3 \text{ cm}$)



Banda C ($\lambda \cong 5 \text{ cm}$)



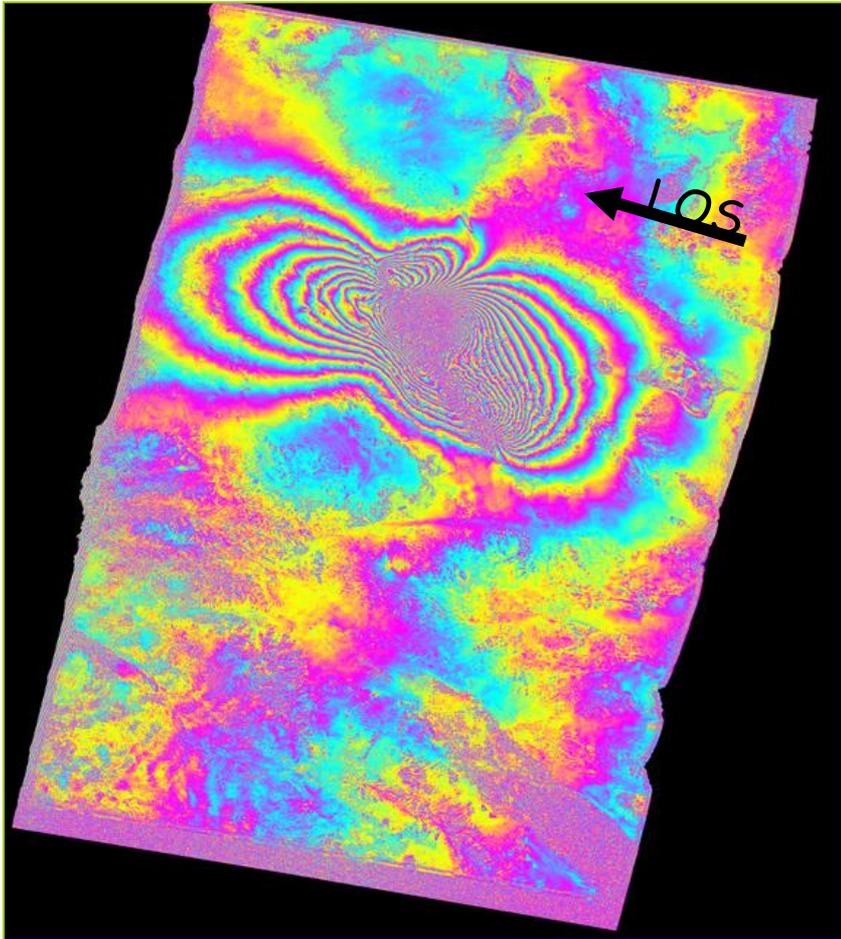
Banda L ($\lambda \cong 23 \text{ cm}$)

A frequência espacial das franjas do interferograma depende do comprimento de onda utilizado.

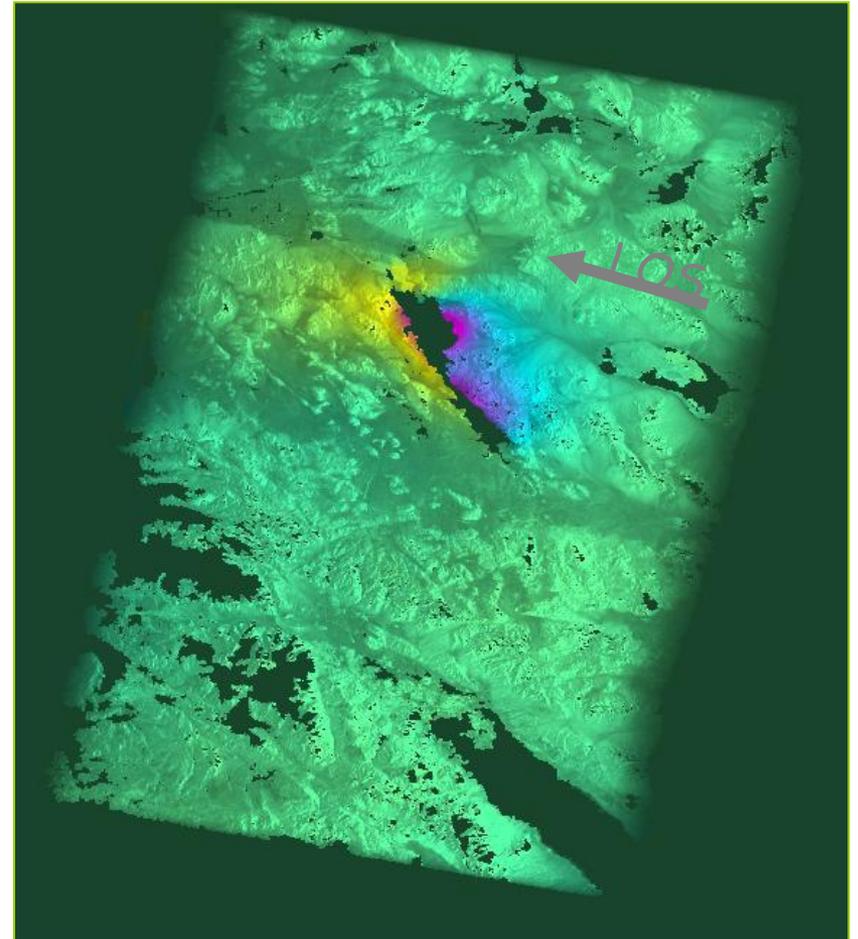
$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda_T}$$

Wrapped vs. Unwrapped

Hector Mine EQ



Color Cycle \sim 3 cm



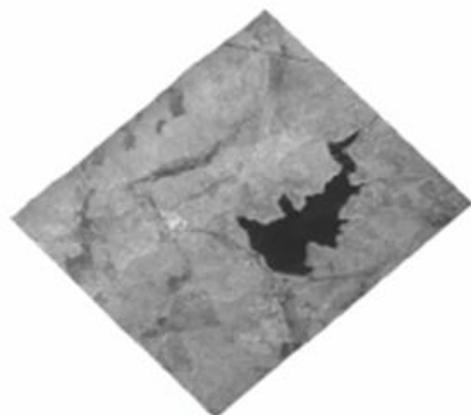
Color Cycle = 300 cm

Interferometria de imagens SAR

Geocodificação InSAR: Exemplo (sensor Aes-1 - Aerosensing)



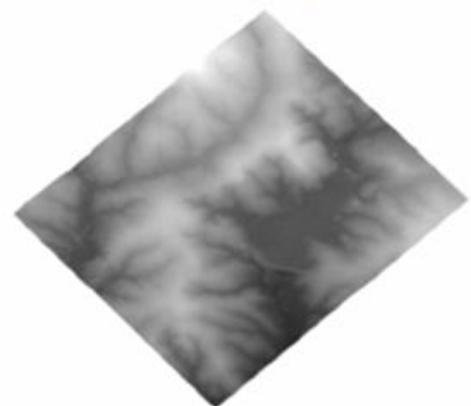
Imagem 1



Orto imagem



Imagem 2

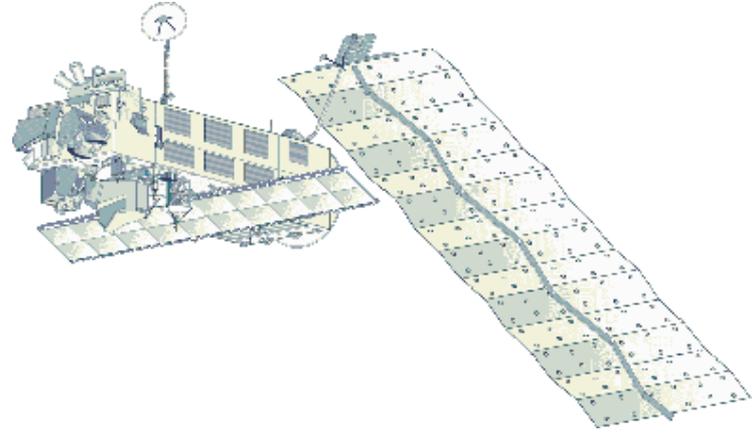


Modelo de Elevação

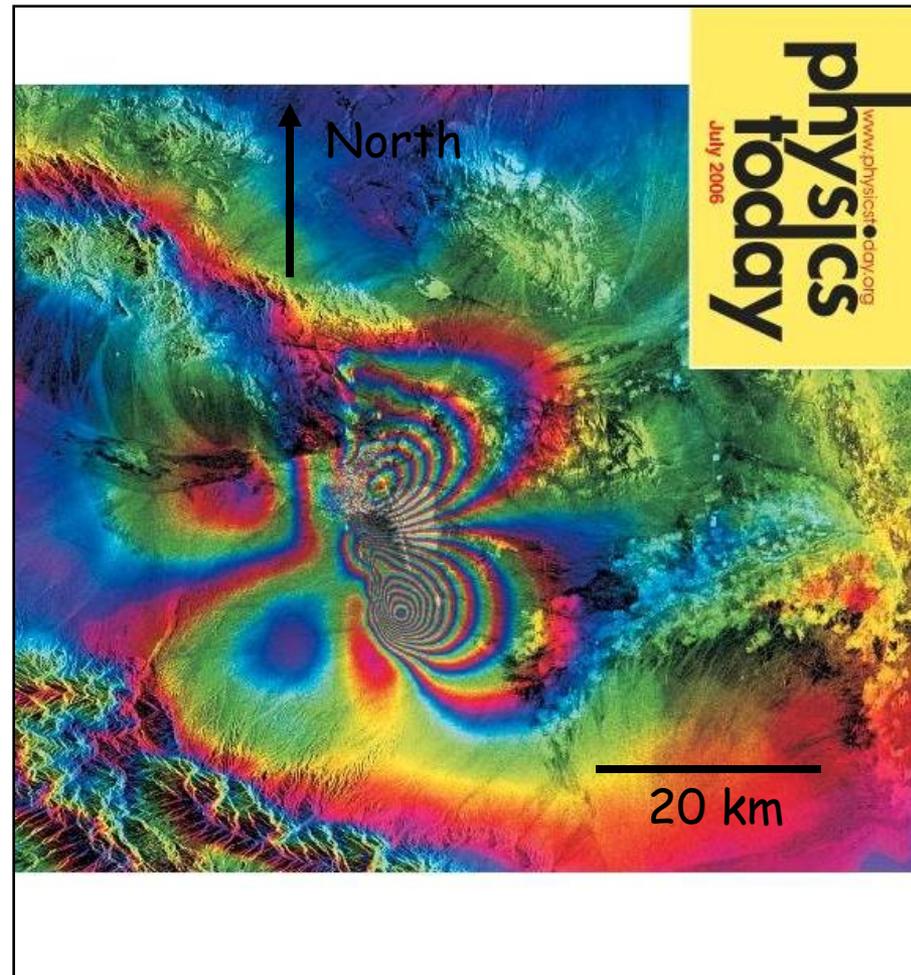


Carta-imagem

Interferometria de imagens SAR

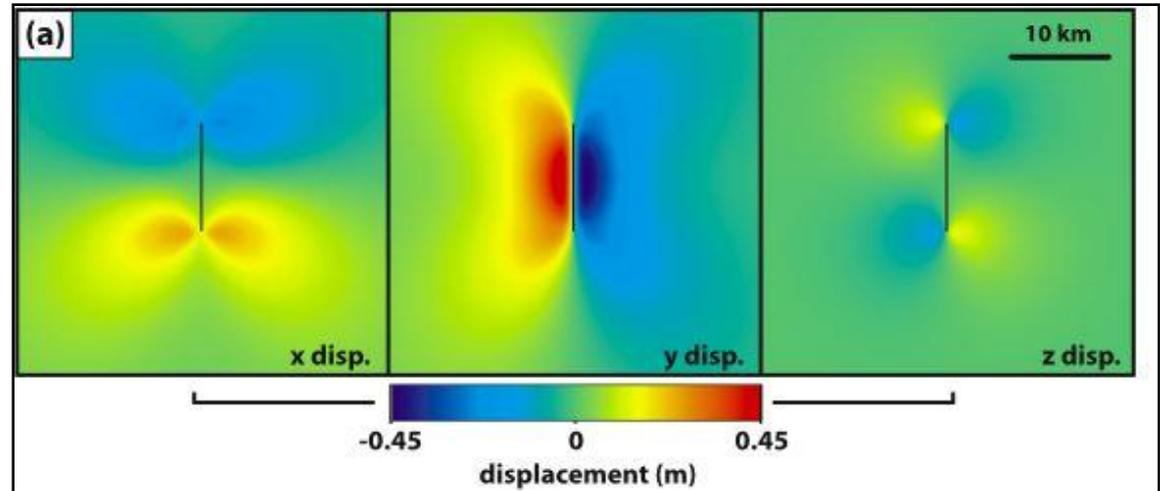
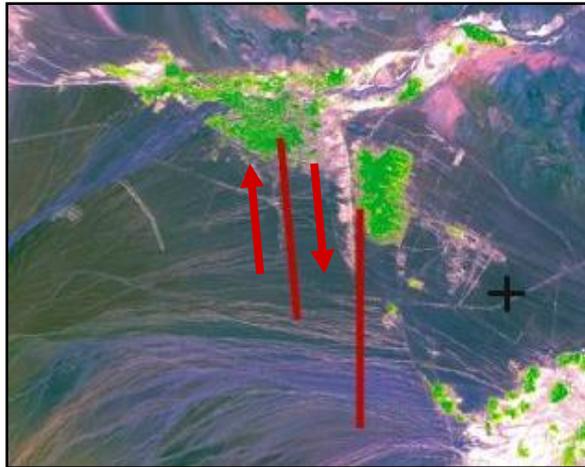


- Cada escena:
 - 20 m por pixel
 - 100 km por imagem
 - deformação \sim mm/year
- Este exemplo:
 - European space Agency Envisat satellite (Banda C, $\lambda=5.6$ cm)
 - Cada listra é 2.8 cm de deformação

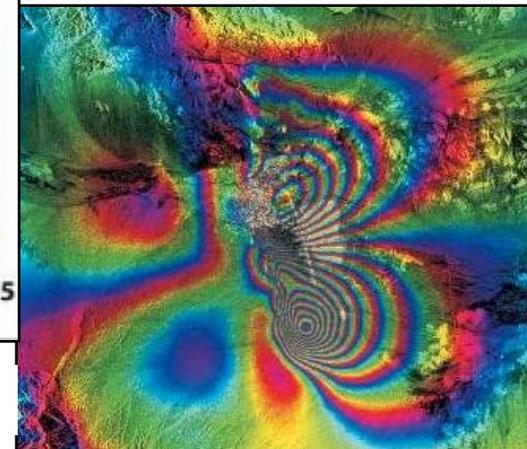
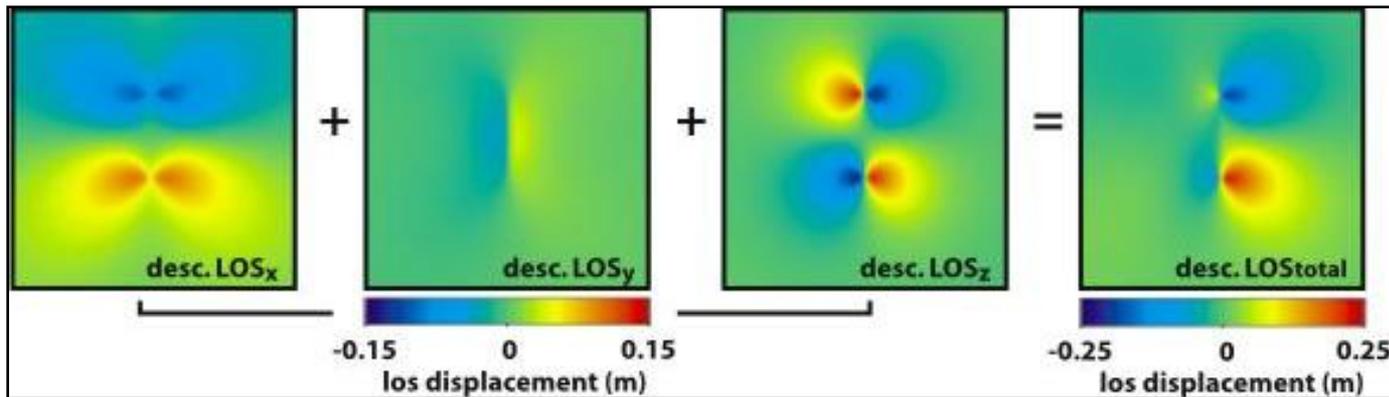


Interferometria de imagens SAR

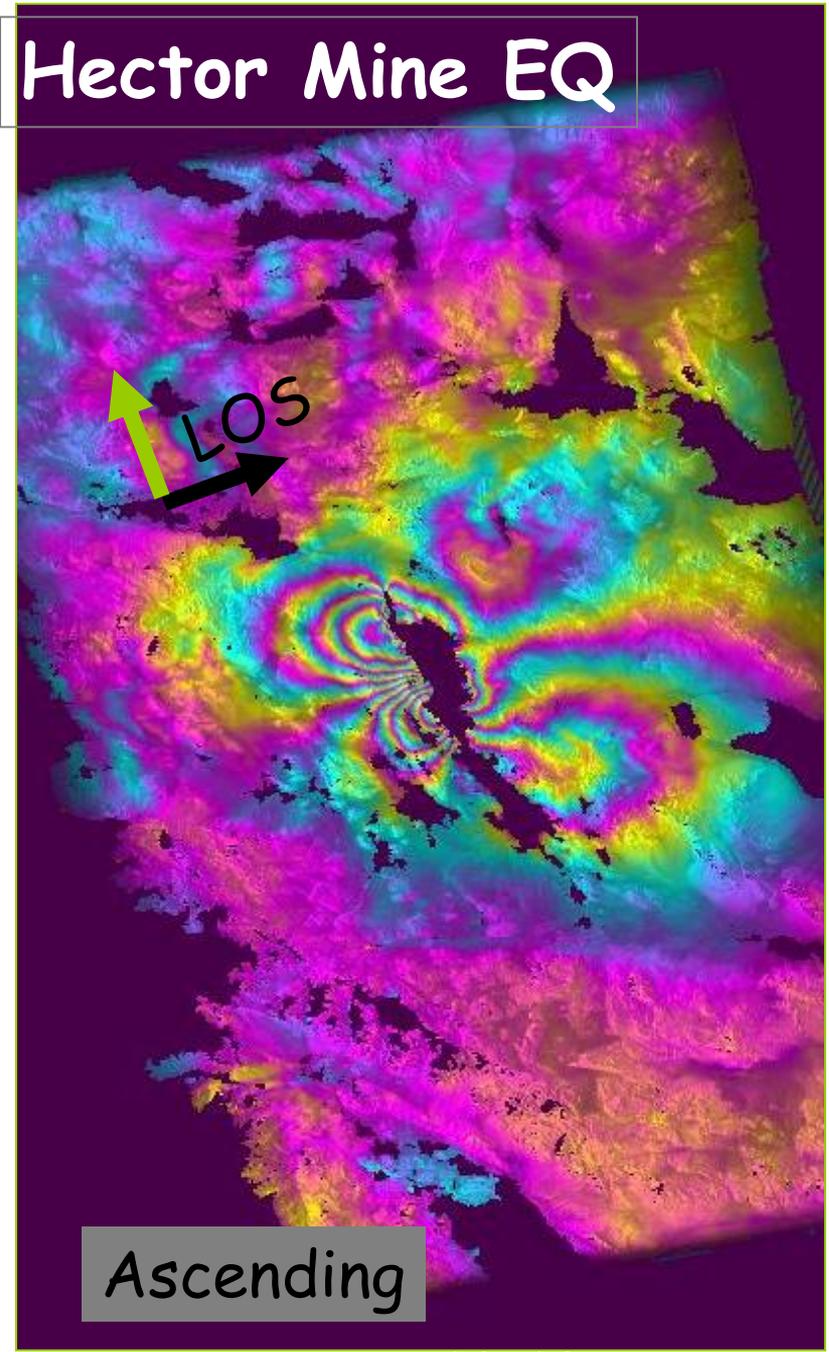
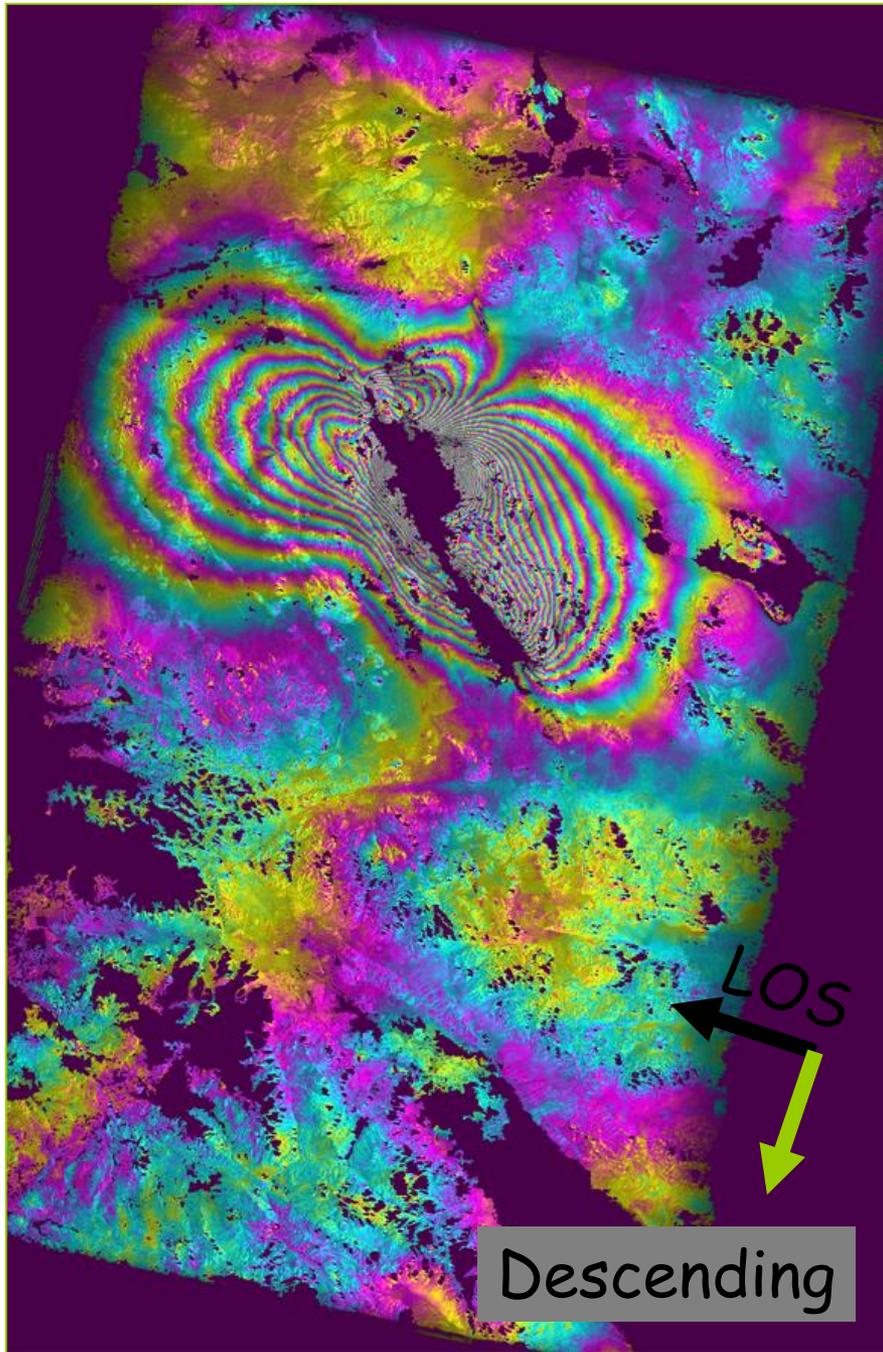
- Passo 1: Movimentação da falha produz deformação 3D



- Passo 2: Deformação 3D é observada pelo satélite de radar (line-of-sight) e cria padrão assimétrico entre a deformação horizontal e vertical. Both images:
Funning et al., 2005



- Passo 3: Cria uma listra a cada $\lambda/2$ em cm ("wrapped image")

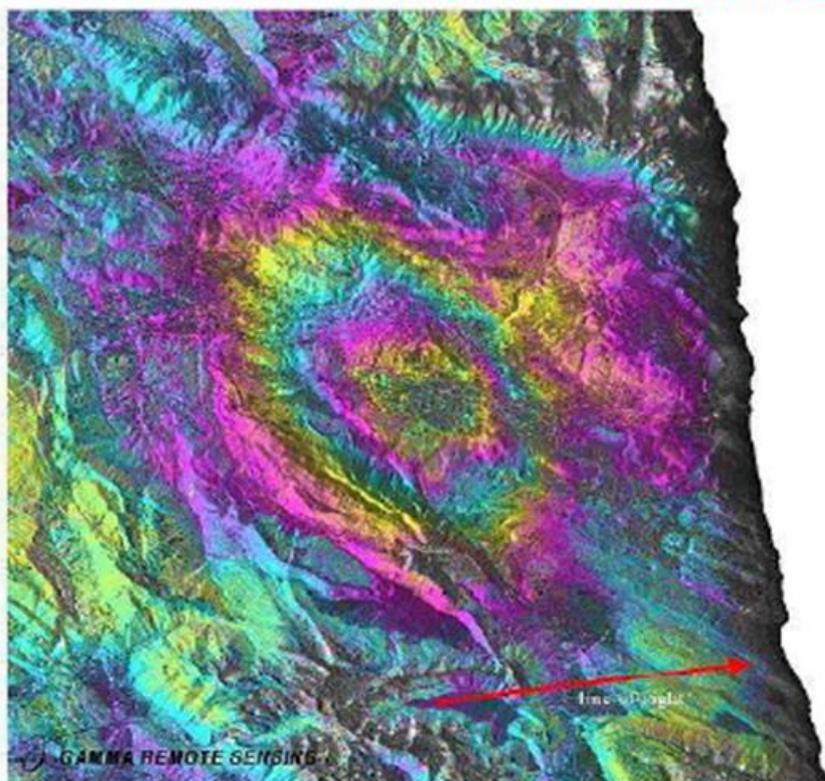


Modified from Rowena Lohman

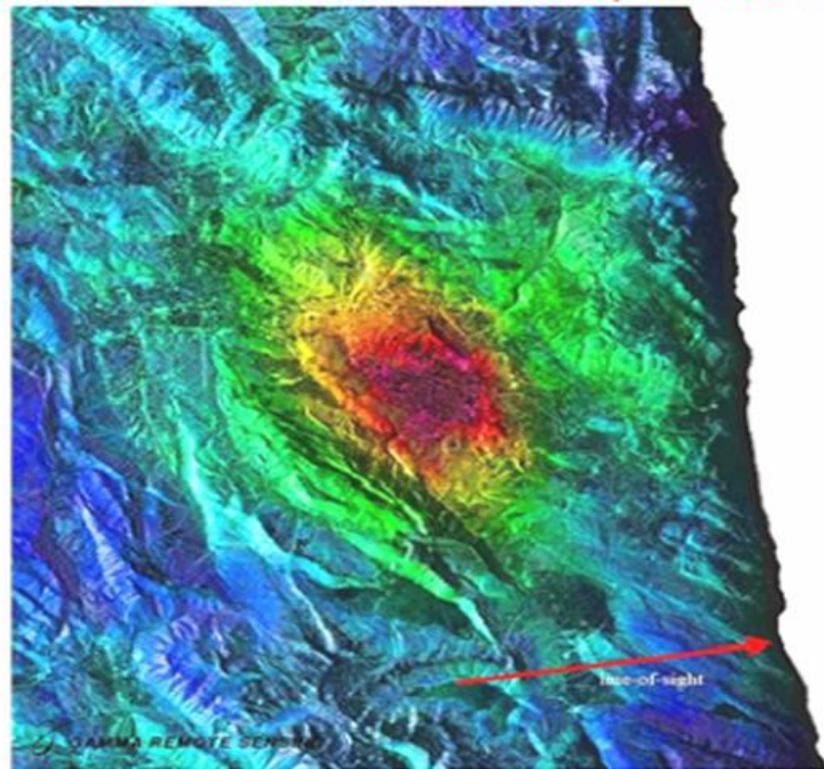
Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

- Exemplo de deformação por terremoto (9 abril 2009 - Abruzzi-IT)

interferométrico do satélite PALSAR- banda L (20/7/2008 - 22/4/2009 = 276 dias, $B_n = -182$ m)



Fase interferométrica diferencial

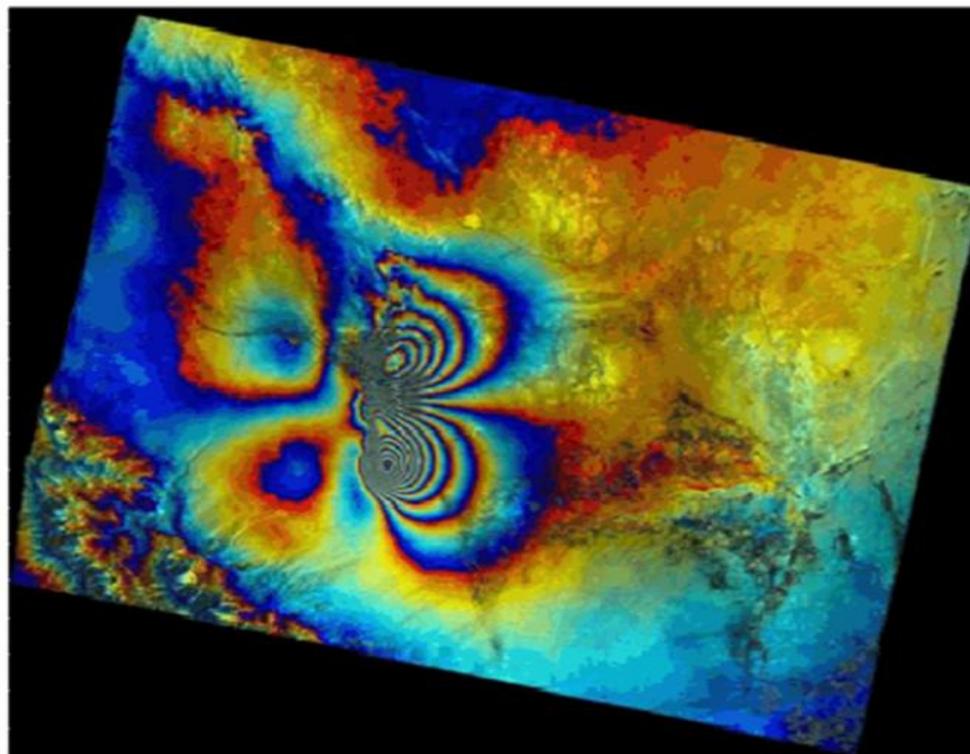


Modelo de deformação

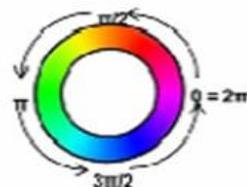
Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

➤ Exemplo de deformação por terremoto:

Par interferométrico do satélite ENVISAT - banda C (2002 - 2003)



Região de Bam - Iran
(26 dez 2003)



Cada ciclo de fase corresponde a 28 mm na linha de visada (LOS)

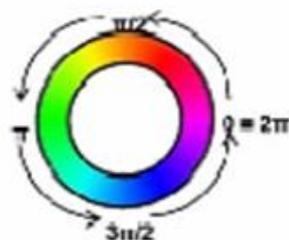
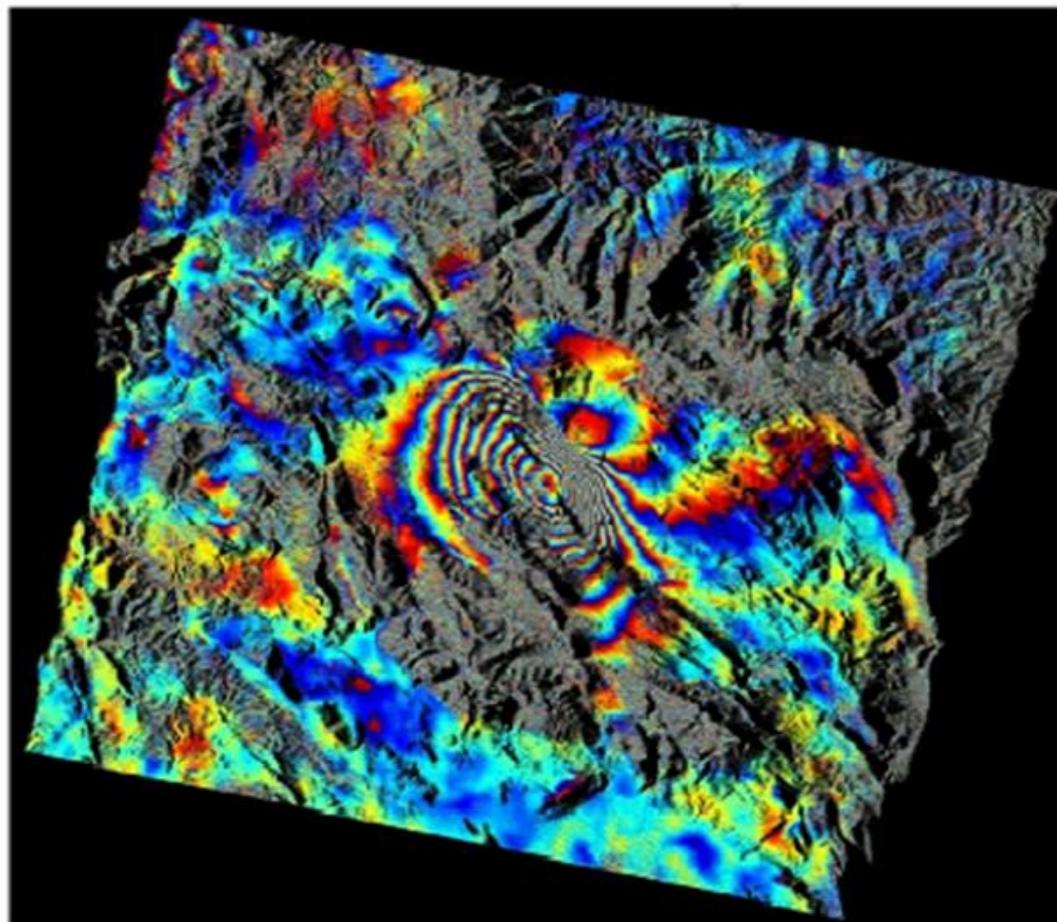
25 Km

Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

Interferometria SAR Diferencial - DInSAR

Exemplo de deformação por terremoto:

Par interferométrico do satélite ENVISAT - banda C (01/02/2009 e 12/04/2009)



6 de Abril 2009 em L'Áquila (Itália)

Fonte: treuro

Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

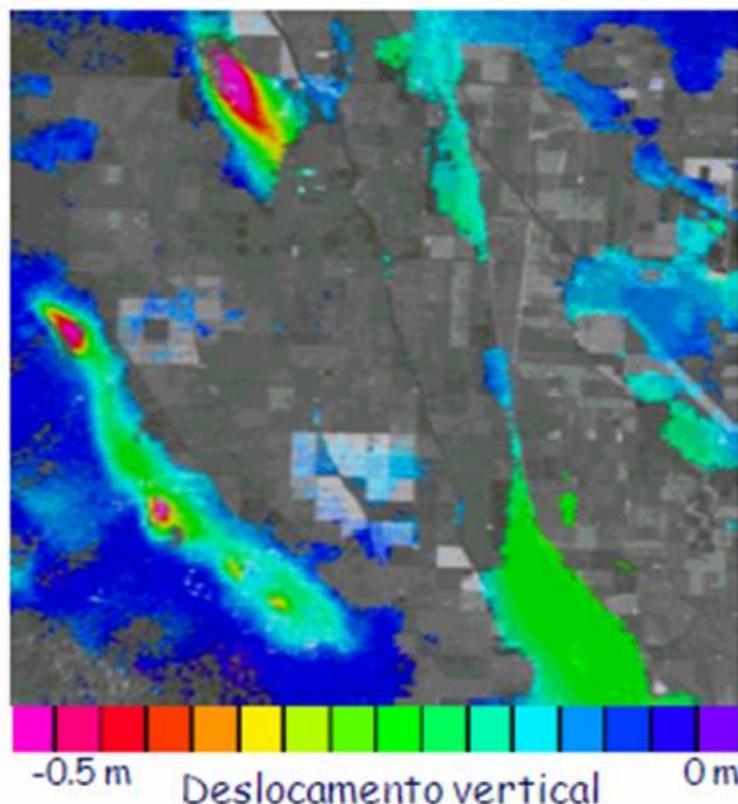
Exemplo de subsidência devido a extração de óleo:

Duas imagens do satélite JERS 1 - banda L (1994 a 1996)
Local: Belridge field (California)



Foto do campo Belridge

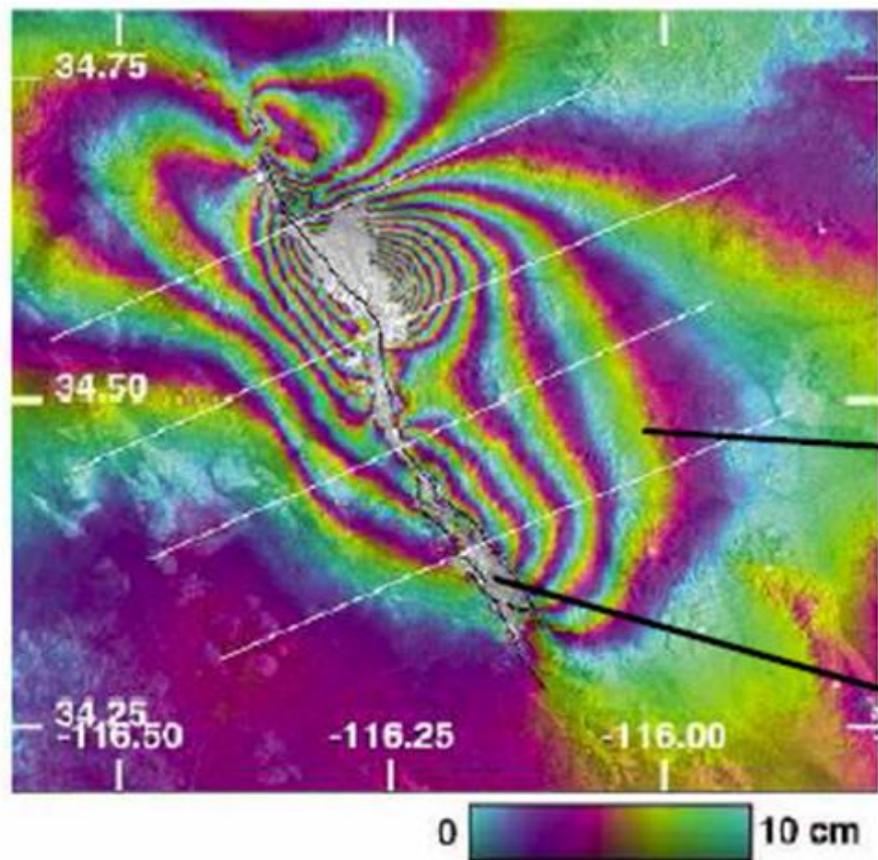
704 dias entre os interferogramas



Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

Exemplo de deformação por terremoto:

Utilizando imagens do satélite ERS 2 em duas passagens, mostrando a diferença de fase devido a abalo sísmico (California- 1999)



Intervalo entre as aquisições = 35 dias

Baseline = 25 m

Fase módulo 2π
(um ciclo de cor)
representando a
medida do movimento
da crosta terrestre

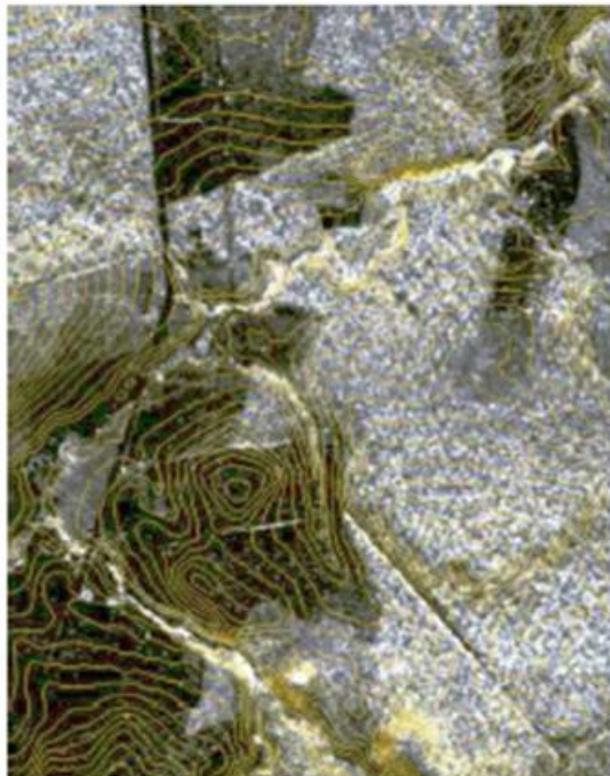
Região de baixa
coerência devido
ao terremoto
(perda de correlação)

Interferometria de imagens SAR

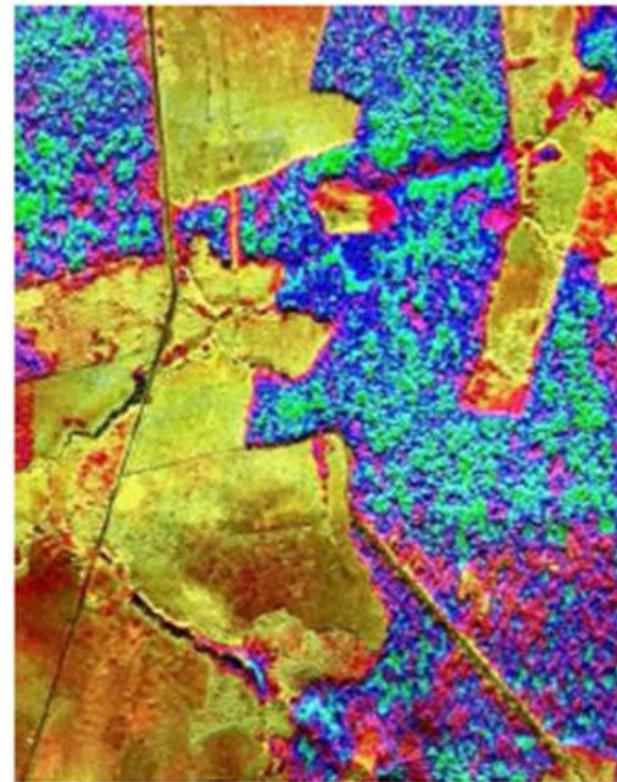
- Experimento da Banda P na Floresta Nacional de Tapajós



Orto-imagem X com
curvas de níveis
espaçadas de 5 metros



Orto-imagem P com
curvas de níveis
espaçadas de 5 metros

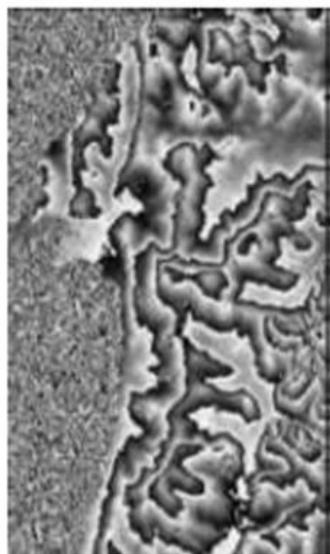


0.3 m  30.0 m

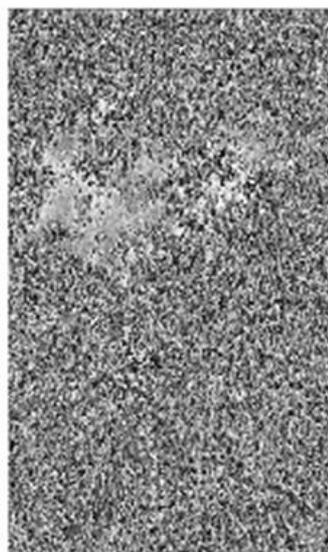
Diferença entre
MET (X - P)

Interferometria SAR Diferencial: DInSAR

Limitações da técnica DInSAR:



Interferograma: 1 dia



15 meses

- Limitação devido a descorrelação temporal.

- Apenas uma pequena porção da imagem mantém informação útil, tipicamente em áreas urbanas e áreas secas (desérticas)

- A fase introduzida por atraso na atmosfera não pode ser estimada

- A técnica DInSAR não é capaz de prover informação de deformação com acurácia milimétrica.

Monitoramento de deformação sísmica
usando interferometria diferencial
D-Insar

Interferometria Diferencial
SAR Usando GMTSAR

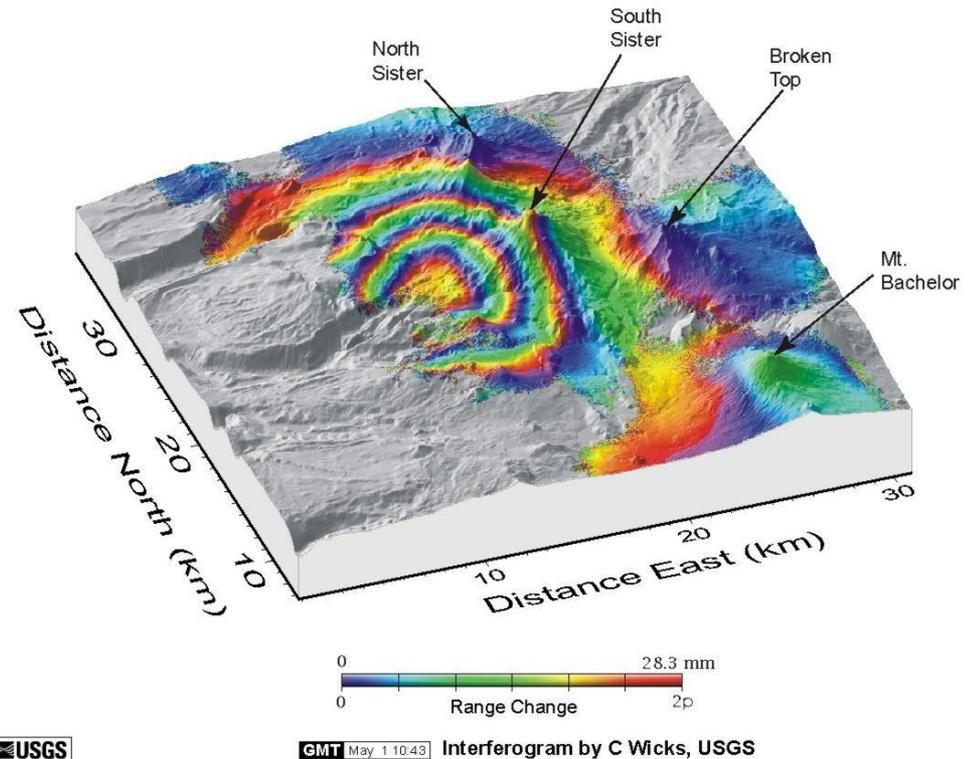
Interferometria Diferencial SAR Usando GMTSAR

- O que é GMTSAR?
- Modos de processamento com GMTSAR
 - 2-pass processing
 - Stacking para series de tempo
 - Interferometria ScanSAR
- Exemplos de processamento metodo com 2-Pass

O que é GMTSAR?

GMTSAR é um sistema (GNU Generic Public License) de processamento InSAR projetado para usuarios de GMT (Generic Mapping Tools), escrito em C e compilado junto com GMT e NETCDF.

O programa aproveita as características das órbitas sub-métricas e o tempo exato, para simplificar os algoritmos de processamento SAR e InSAR.



[Home](#)

[Downloads](#)

[Generate DEM](#)

[Contact](#)

[Links](#)

[Get SAR data](#)

[GMT Hawaii](#)

An InSAR processing system based on GMT

David Sandwell - Scripps Institution of Oceanography

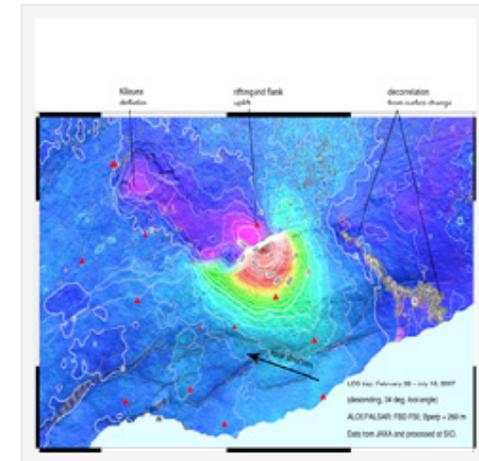
Rob Mellors - San Diego State University

Xiaopeng Tong - Scripps Institution of Oceanography

Meng Wei - Scripps Institution of Oceanography

Paul Wessel - University of Hawaii

Looking for volunteers to develop scripts



GMTSAR is an open source (GNU General Public License) InSAR processing system designed for users familiar with **Generic Mapping Tools (GMT)**. The code is written in C and will compile on any computer where GMT and NETCDF are installed. The system has three main components:

1. a preprocessor for each satellite data type (e.g., ERS, Envisat, and ALOS) to convert the native format and orbital information into a generic format
2. an InSAR processor to focus and align stacks of images, map topography into phase, and form the complex interferogram
3. a postprocessor, mostly based on GMT, to filter the interferogram and construct interferometric products of phase, coherence, phase gradient, and line-of sight displacement in both radar and geographic coordinates.

GMT is used to display all the products as postscript files and KML images for Google Earth. A set of C-shell scripts has been developed for standard 2-pass processing as well as image alignment for stacking and time series. ScanSAR processing is also possible but requires a knowledgeable user. Users are welcome to contribute to this effort. In particular contributions using other scripting languages such as Perl and Python are desired.

ACKNOWLEDGEMENTS This research was supported by ConocoPhillips, Scripps Institution of Oceanography, and San Diego State University.

Objetivos e limitações do GMTSAR

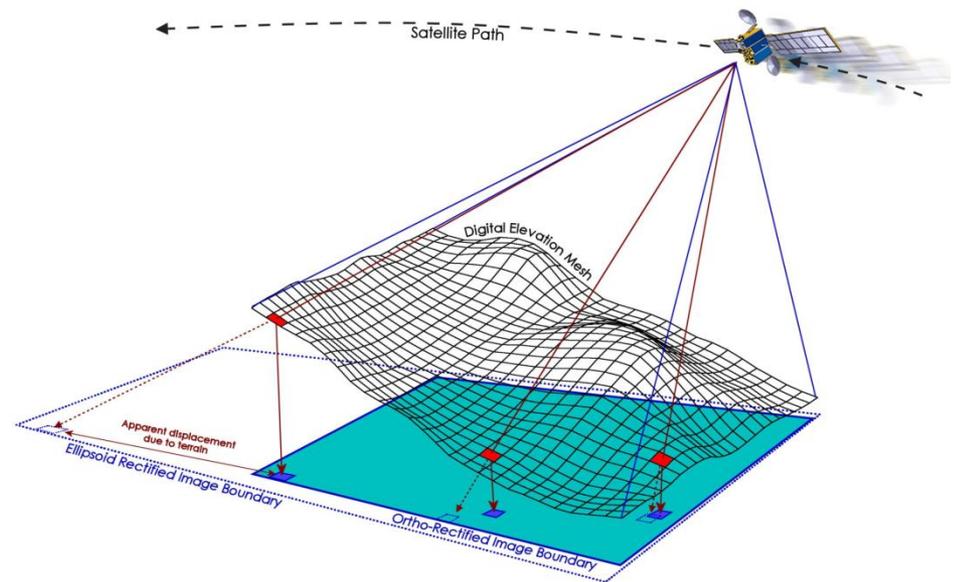
- O GMTSAR foi projetado para ser usado com dados SAR brutos em coordenadas de radar, conjuntamente com informação orbital precisa, para depois calcular produtos interferométricos em coordenadas geográficas.
- O lado negativo dessa abordagem é que os satélites SAR que têm órbitas menos precisas (> 10 m, exemplo: RADARSAT-1 and JERS-1) não podem ser facilmente processados usando GMTSAR.
- Mas a precisão geométrica e de fase assegura que os mosaicos de muitas imagens ao longo de uma faixa ou combinações de faixas de ScanSAR, se encaixem perfeitamente em coordenadas geográficas.

Necessidade de informação orbital precisa

O software GMTSAR só irá proporcionar uma saída segura de interferometria onde informação orbital precisa dos satélites seja disponível. Isso inclui (ERS1, ERS2, Envisat, ALOS e TerraSAR-X).

Esta informação é utilizada em quatro aspectos do processamento:

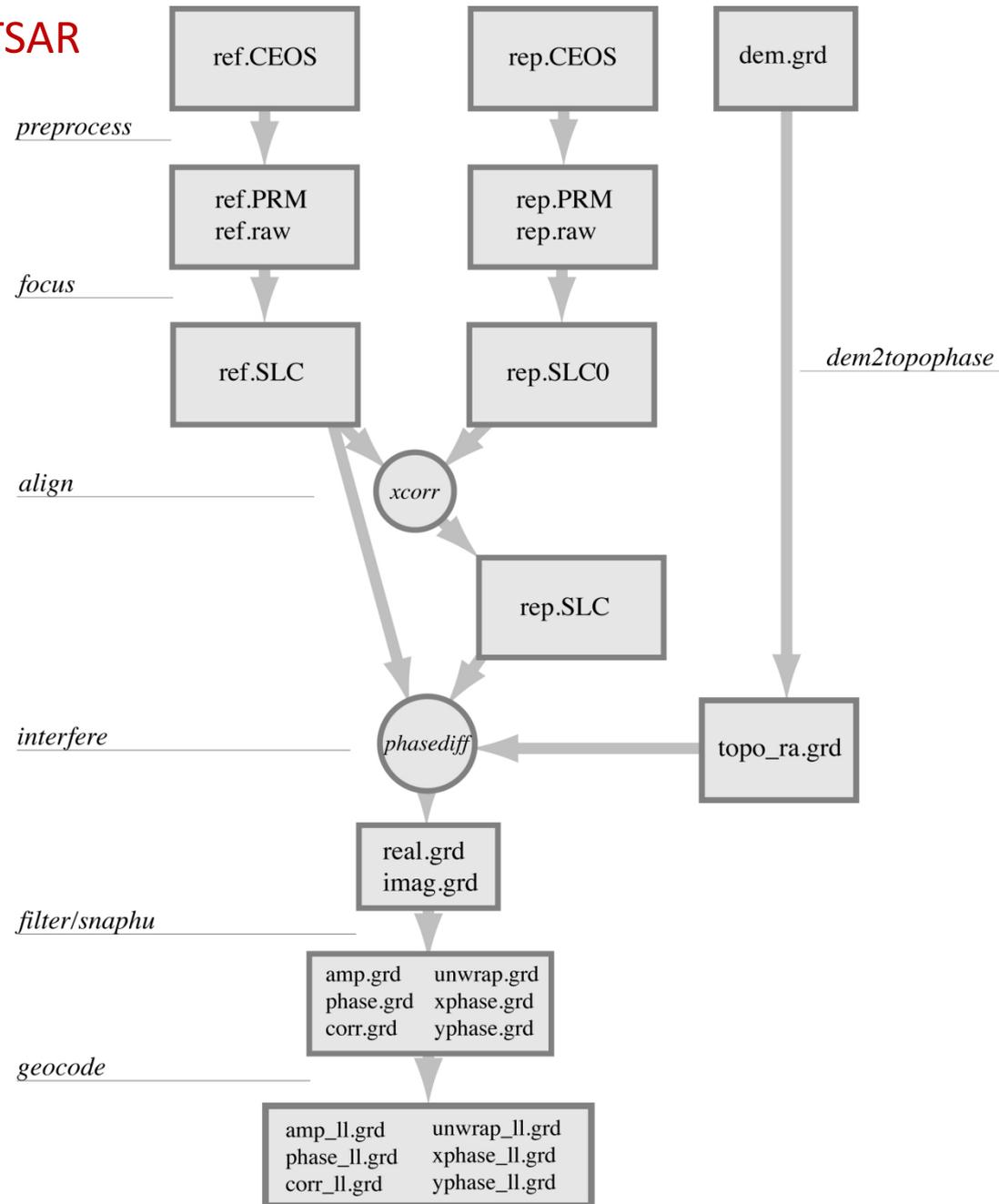
- Focado da imagen (corregir deslocamento espectral em range)
- Transformação entre coordenadas geográficas e de radar.
- Alinhamento - registro das imagens (Registro grosseiro e fino).
- Remoção da fase da superfície plana.



Modos de processamento com GMTSAR

2-pass processing

- Uma abordagem comum para processamento InSAR é formar um interferograma usando um par de imagens SAR e um modelo de elevação digital.
- Para o processamento é necessário para gerar um modelo digital de elevação, abrangendo uma área maior do que a cobertura SAR.
- Sendo que as alturas são referenciadas ao elipsóide WGS84 e não o geóide. O DEM de qualquer área da terra pode ser criada usando o website
- <http://topex.ucsd.edu/gmtsar>.



Northern Baja California Earthquake

EVID	MAG	Date	Time	Lat	Long	Depth
14607652	7.2	4/4/2010	15:40:42	32 15.5N	115 17.2W	10



Fotos de campo exhibindo deslocamento vertical superior a 2 metros. John Fletcher, Prof. CICESE, Orlando Teran, Ph.D. Student

D-InSAR usando 2-Pass Processing

Este é um exemplo do uso da metodologia 2-Pass Processing, para obter um interferograma do terremoto no norte da Baja California.

Os dados brutos consistem em um par de imagens ALOS PALSAR em formato L1.0 CEOS. Uma imagem FBS antes e uma imagem FBD depois após do terremoto.

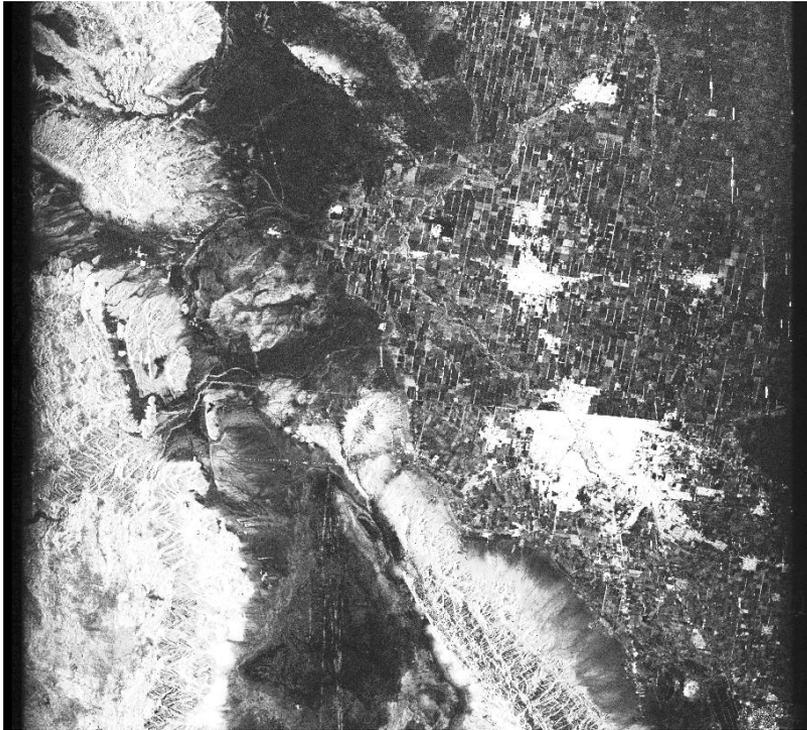
O diretório /raw deve conter 4 arquivos:

```
IMG-HH-ALPSRP207600640-H1.0__A  LED-ALPSRP207600640-H1.0__A  
IMG-HH-ALPSRP227730640-H1.0__A  LED-ALPSRP227730640-H1.0__A
```

```
p2p_ALOS.csh IMG-HH-ALPSRP207600640-H1.0__A IMG-HH-ALPSRP227730640-H1.0__A  
config.alos.txt
```

```
2 # This is an example configuration file for p2p_ALOS.csh  
3 #  
4 # all the comments or explanations are marked by "#"  
5 # The parameters in this configuration file is distinguished by their first word so  
6 # user should follow the naming of each parameter.  
7 # the parameter name, = sign, parameter value should be separated by space " ".  
8 # leave the parameter value blank if using default value.  
9 #  
10 #####  
11 # Satellite      #  
12 # ALOS or ENVI  #  
13 #####  
14 SAT = ALOS  
15
```

Imagens de Amplitude

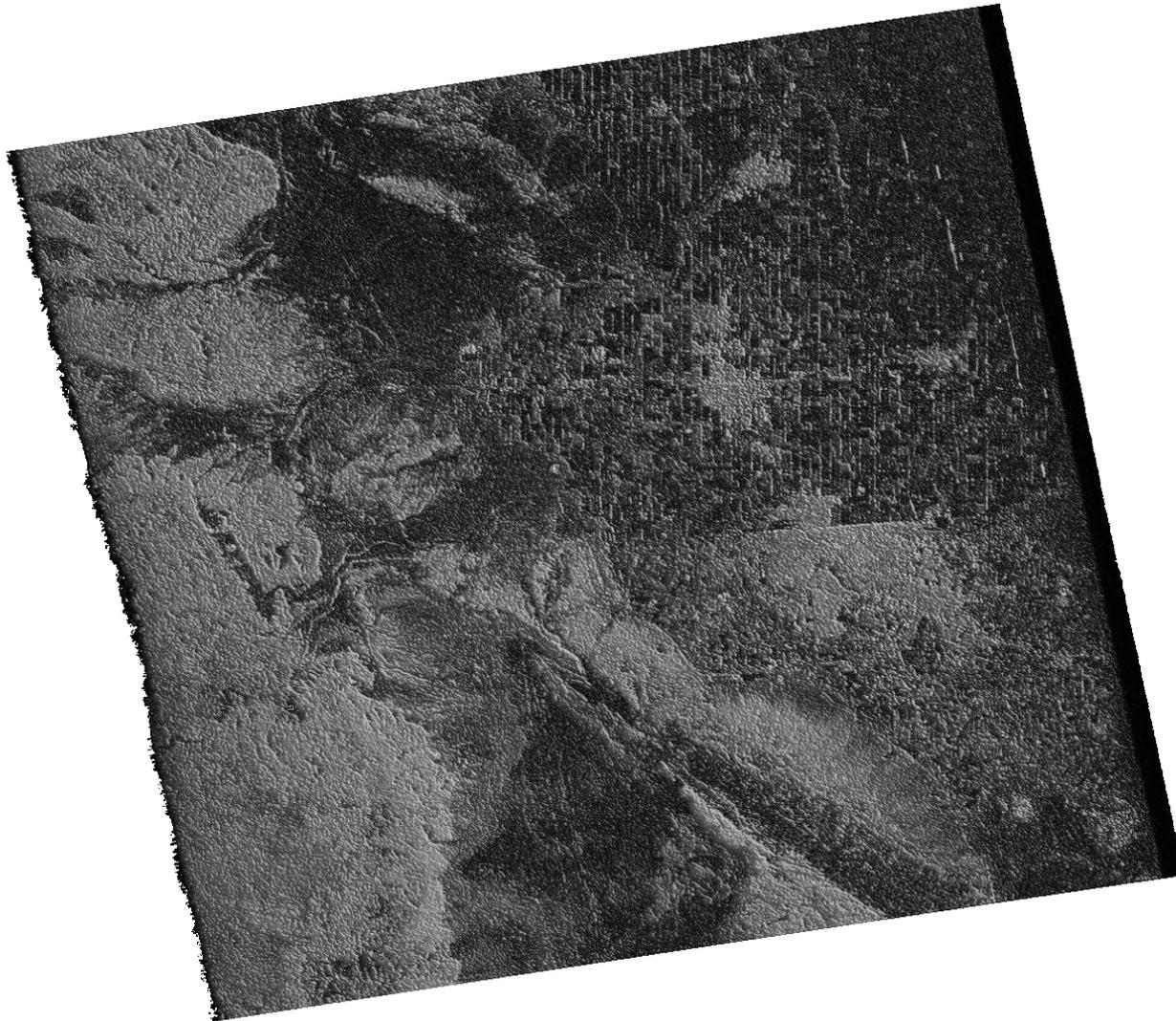


Em coordenadas de radar

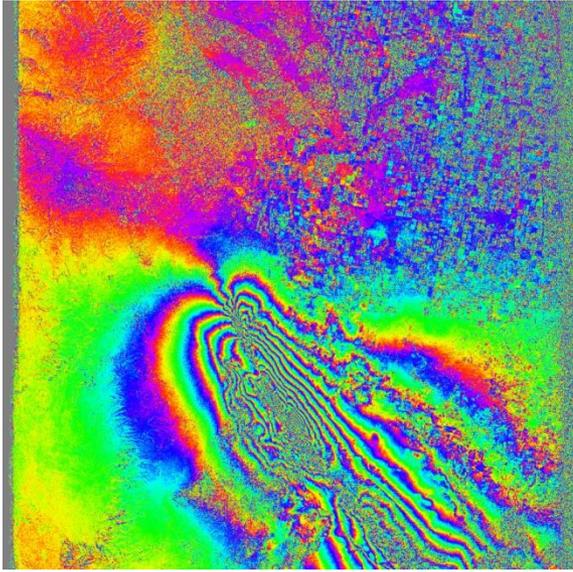


Geocodificada

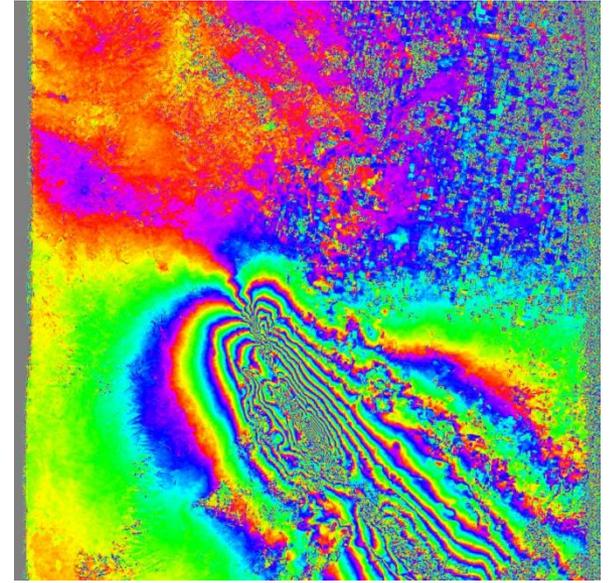
Imagen de coherencia



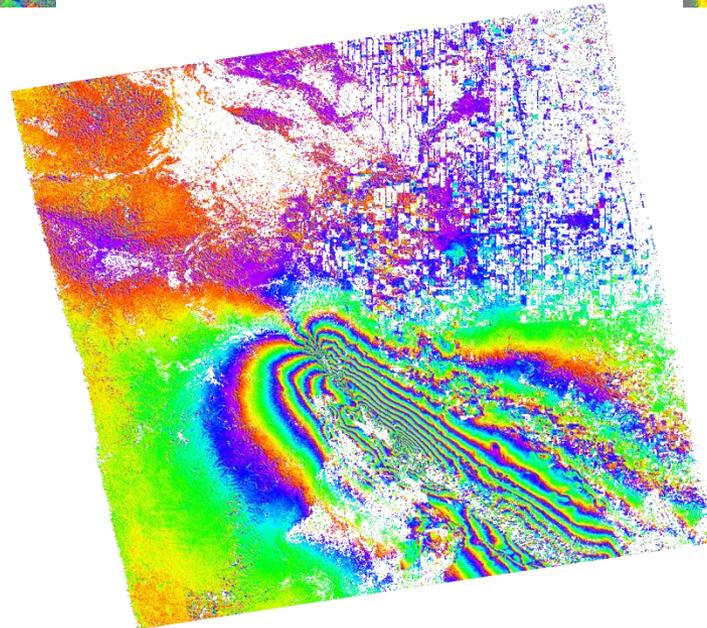
Imagens da fase



Em coordenadas de radar

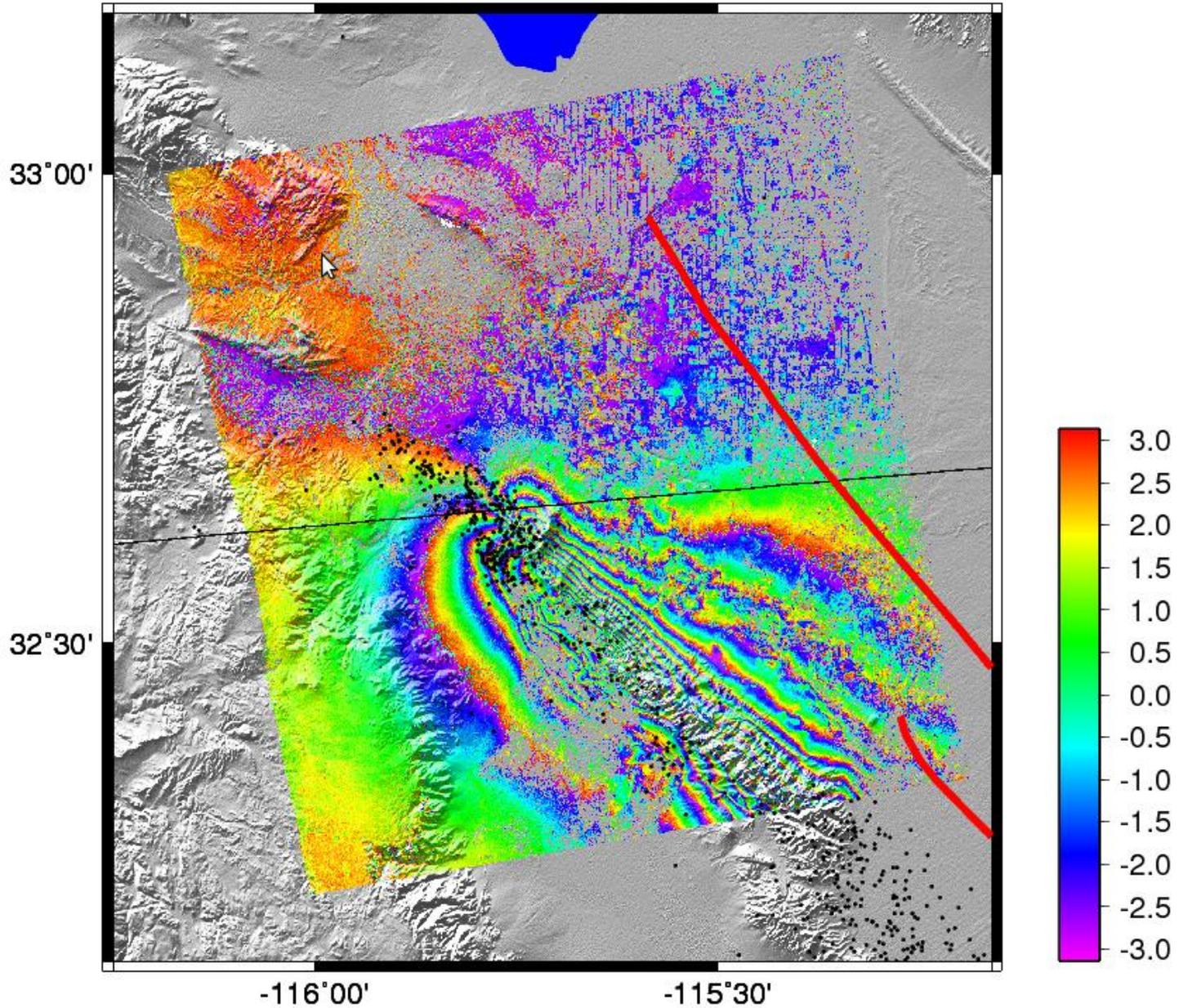


Fase filtrada



Fase geocodificada

Resultado

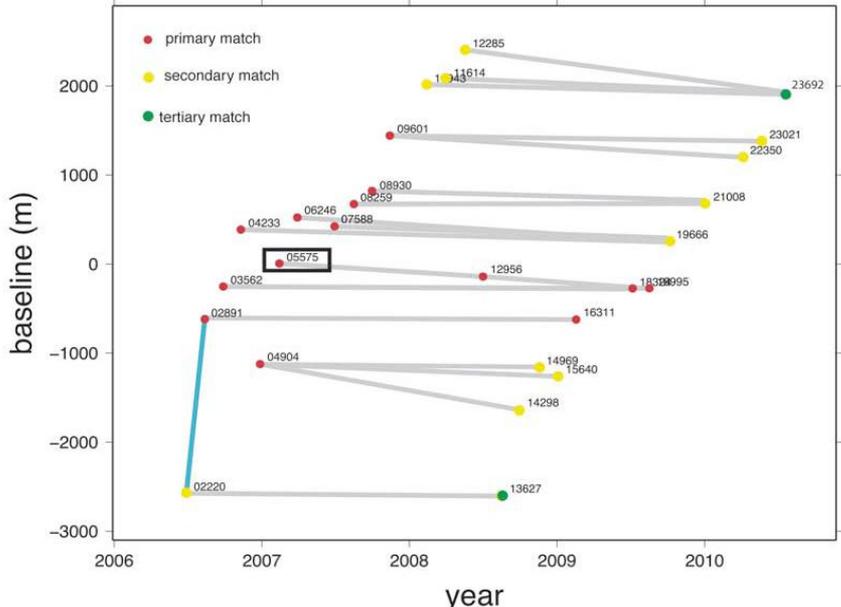
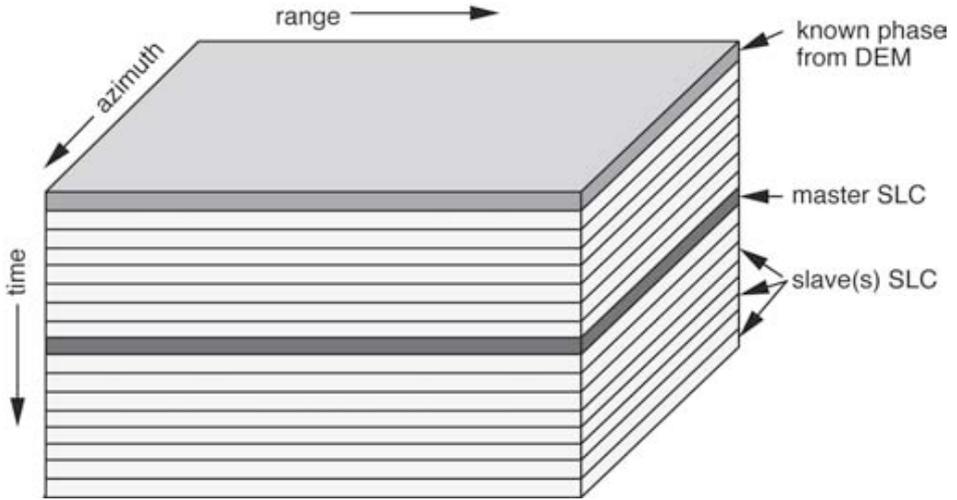


Modos de processamento com GMTSAR

Stacking para series de tempo

Usando GMTSAR há uma variedade de métodos que variam de pequenos subconjuntos de linha de base a série de tempo para o método de persistent scattering.

O Diagrama da direita mostra uma pilha de imagens SAR e uma imagem de fase topográfica.



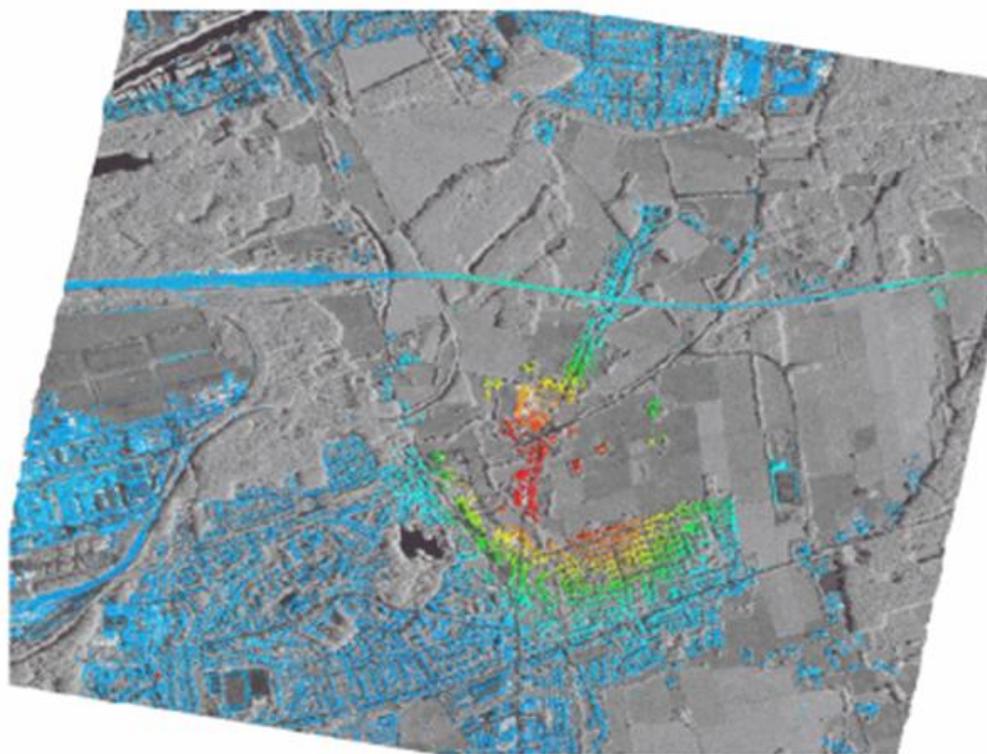
Na figura da esquerda: linhas de base versus tempo. São mostrados pontos coloridos que representam o alinhamento das imagens: principal (vermelho), secundário (amarelo) e terciário (verde).

As linhas cinzas foram adicionados e representam os candidatos a interferogramas.

Interferometria de imagens SAR

- Interferometria SAR diferencial: Persistent Scatterer

Exemplo de subsidência de refletor persistente em área de mineração de carvão subterrânea, a uma profundidade média de 1400 m (área: Ruhr-Alemanha)



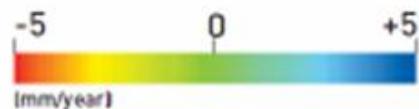
20 imagens do
satélite
TerraSAR-X
de 11/2/2010
a
21/10/2010

Período entre
as aquisições
foi de 11 dias
com resolução
espacial de 3m

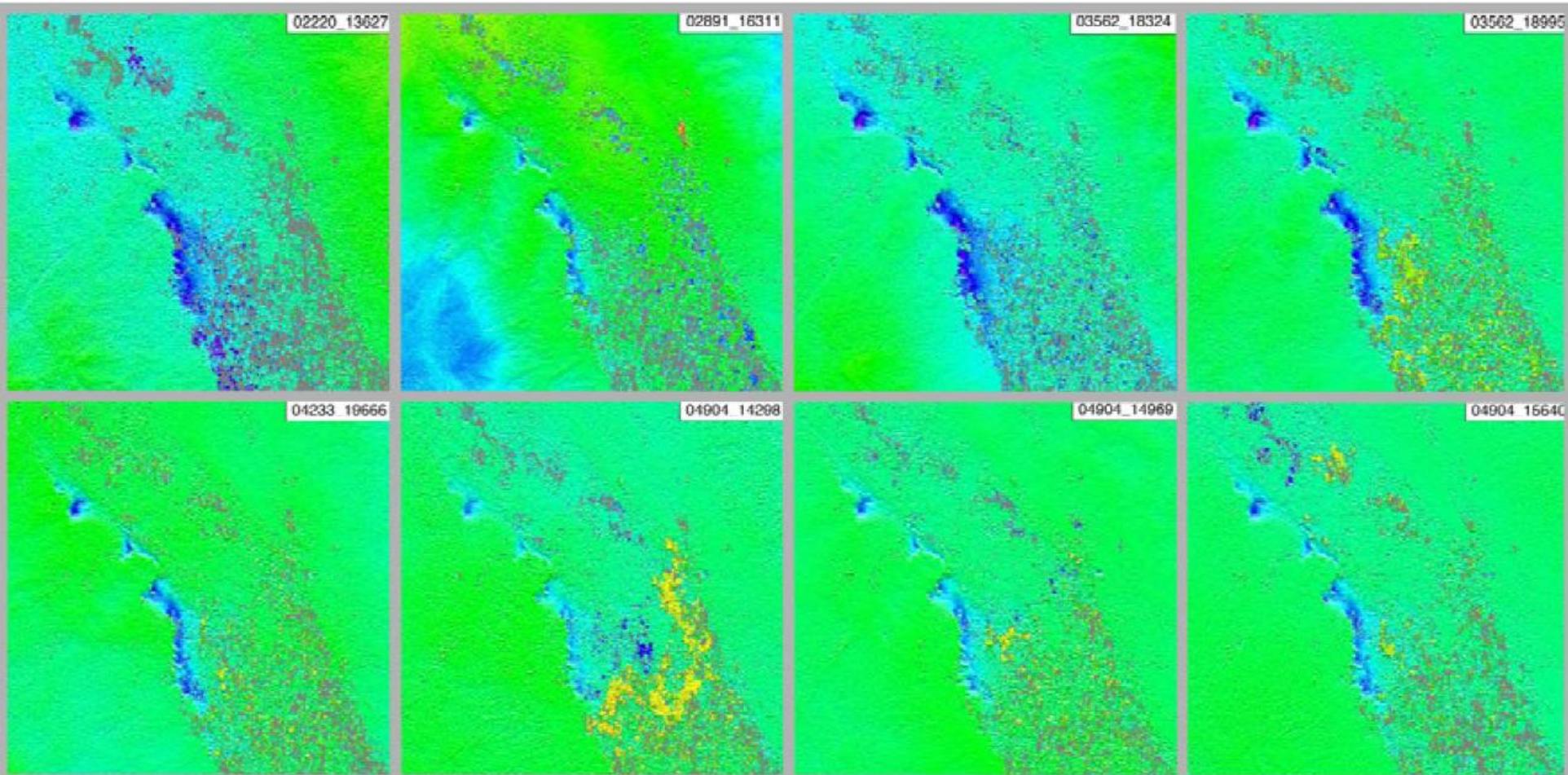
Interferometria de imagens SAR

Exemplo do uso da técnica PSInSAR

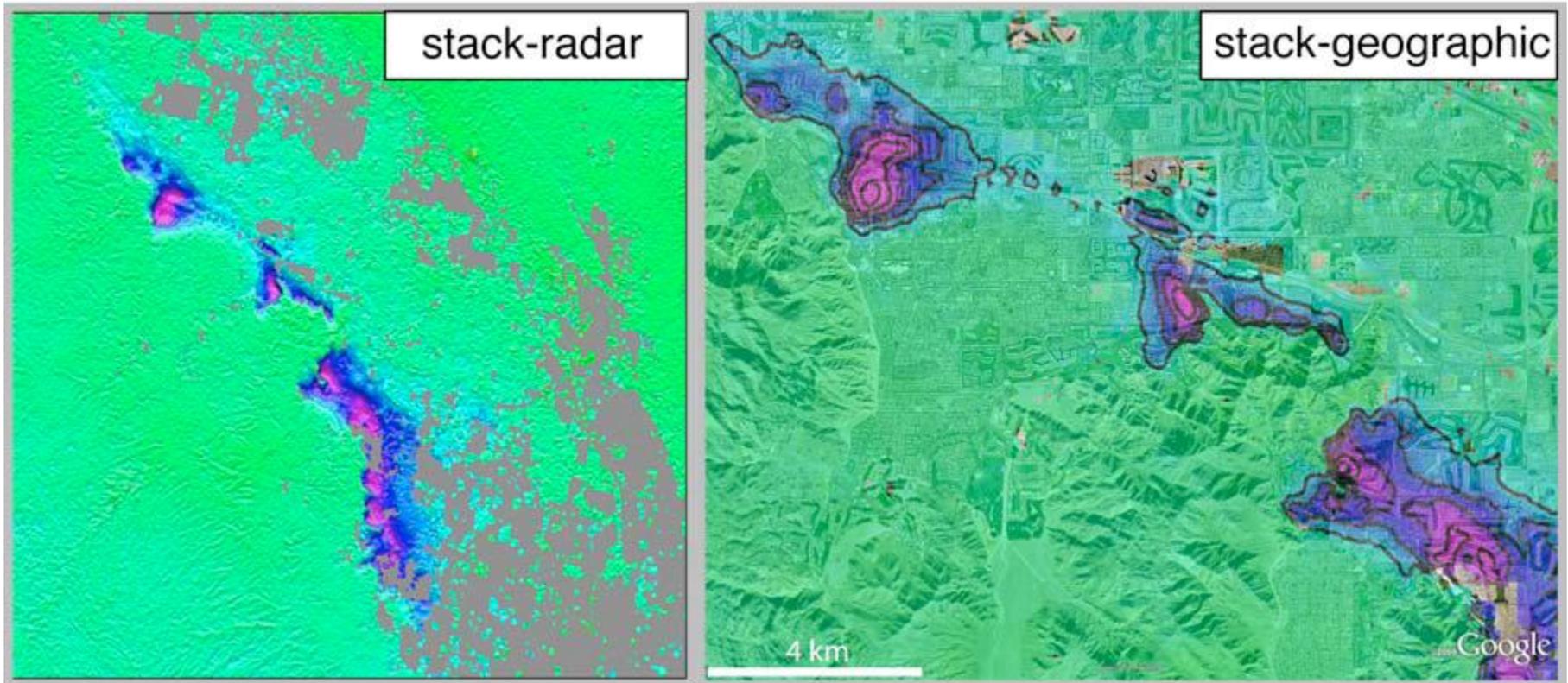
Exemplo de deformação na Baía de São Francisco - Falha de San Andreas



Conjunto de imagens do ERS-1: 1992 a 2000



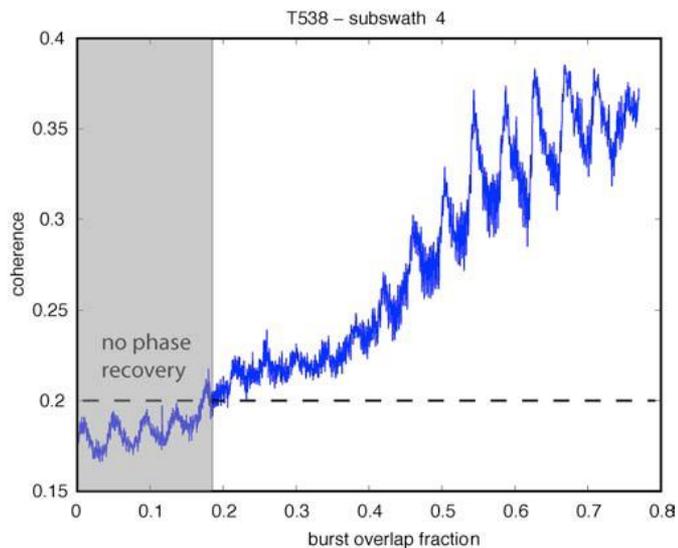
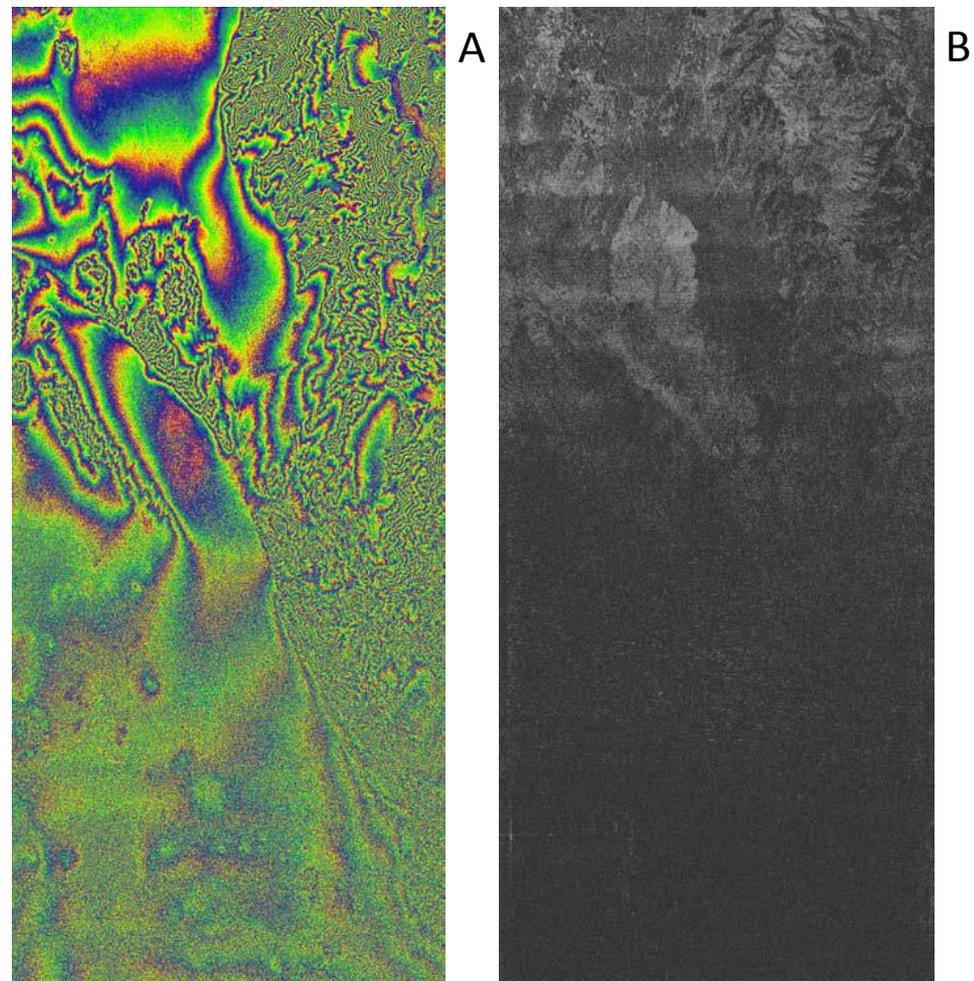
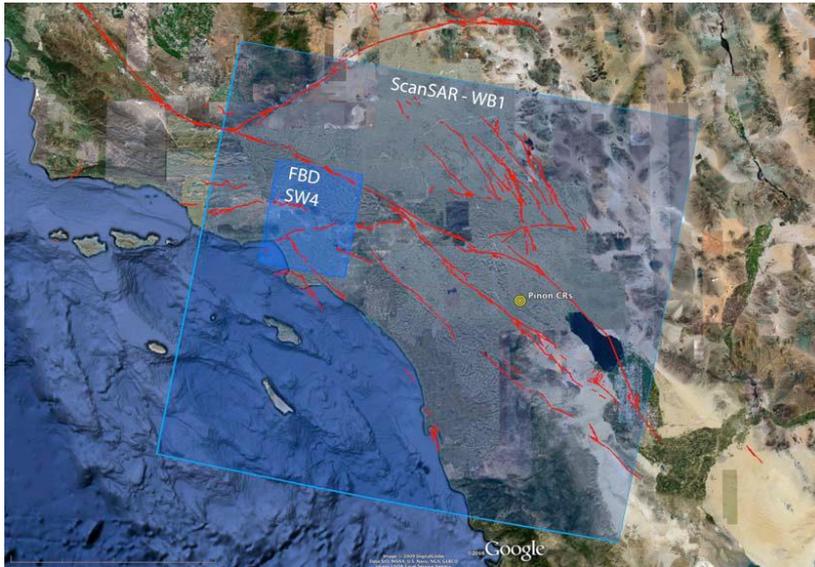
Seis interferogramas de uma pequena área no Coachella Valley, onde subsidência do solo é proeminente. A cor azul denota movimento afastandose do radar. Escala de cores saturada em + / - 10 cm. A projeção é em coordenadas de radar.



Exemplo de permanent scatterer realizado usando GMTSAR, os contornos ou linhas de nível são de 1 cm/ano, deslocamento LOS em direção a radar (principalmente vertical, neste caso). (à esquerda) coordenadas de radar e (direita) coordenadas geográficas. Taxas de subsidência superior a 4 cm/ano, Palm Desert, Indian Wells, e áreas La Quinta devido ao bombeamento de águas subterrâneas [USGS, 2007].

Modos de processamento com GMTSAR

Interferometria ScanSAR



Interferogramas ScanSAR a ScanSAR para 4 subfaixas do track 538 da bacia de Los Angeles. A linha de base perpendicular é de 450m e o intervalo é de 92 dias. A) Fase interferometrica alta no topo da imagen onde o burst overlap é grande. B) A coerencia também decrece desde o topo da imagen. C) Coherencia média da fila versus burst overlap.

Referencias

- Bracewell, R. N. (1978), *The Fourier Transform and Its Applications*, second ed., 444pp., McGraw-Hill Book Co., New York.
- Curlander and McDonough, *Synthetic Aperture Radar: Systems & Signal Processing*, Chapter 4, John Wiley & Sons, New York, 1991.)
- Rees, W. G. (2001), *Physical Principles of Remote Sensing*, second edition ed., 343 pp., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Bertran-Ortiz, A., and H.A. Zebker (2007), ScanSAR-to-Stripmap Mode Interferometry Processing Using ENVISAT/ASAR Data, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing*, Vol. 45, No. 11, pp. 3468-3480.
- Chen C. W. and H. A. Zebker, Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 17, pp. 401-414 (2000).
- Curlander and McDonough, *Synthetic Aperture Radar: Systems & Signal Processing*, Chapter 4, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- Farr, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P., 1992. *Numerical recipes in C*, Second Edition. Cambridge University Press New York, 994 pp.
- Sandwell, D. T. and E. J. Price, Phase gradient approach to stacking interferograms, *J. Geophys. Res.*, 103, 30183-30204, 1998.
- David Sandwell, Rob Mellors, Xiaopeng Tong, Matt Wei, and Paul Wessel., *GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools*, October, 2010.
- Sneed, M. and J. Brandt, Detection and Measurement of Land Subsidence Using GPS Surveying and InSAR, Coachella Valley, California, 1996-2006, *USGS Scientific Investigations Report*, 2007-5251, 41 pp., 2007
- Swartztrauber, P. N., Vectorizing the FFTs, in *Parallel Computations* (G. Rodrigue, ed.), Academic Press, 1982, pp. 51--83.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith, New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, vol. 79 (47), pp. 579, 1998.

Gracias!!!