



## ARSET

Applied Remote Sensing Training

<http://arset.gsfc.nasa.gov>

 @NASAARSET

---

# Introducción a la Interferometría SAR

---

Eric Fielding

Jet Propulsion Laboratory

# Objetivos de Aprendizaje

Al finalizar esta presentación los participantes podrán:

- Entender la física básica de la interferometría SAR
- Describir lo que la fase interferométrica SAR nos dice acerca de la superficie terrestre
- Describir el preprocesamiento de datos necesario
- Entender el contenido informático en las imágenes SAR interferométricas

# Prerrequisitos

- Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética
- Procesamiento y Análisis de Imágenes SAR

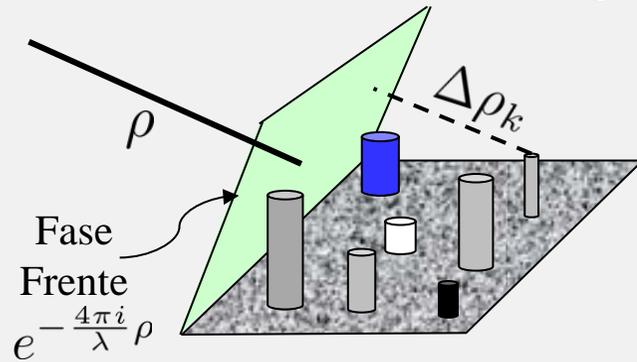
A grayscale Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometric image showing a complex network of river channels and floodplains. The image is characterized by bright, winding lines representing the river channels, set against a darker, textured background of the surrounding land. The overall appearance is that of a topographic map derived from radar data.

# Teoría Interferométrica de SAR

---

# Imágenes SAR y Speckle

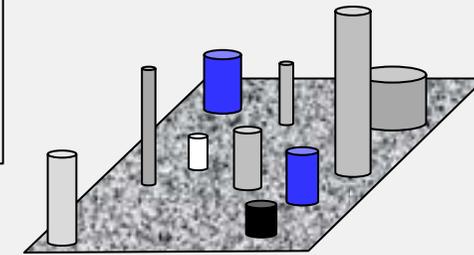
- Las imágenes SAR de resolución completa tienen una apariencia granulada que se llama speckle, lo cual es un fenómeno causado por la naturaleza coherente de las imágenes SAR.



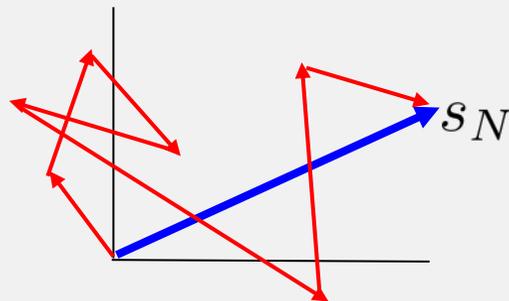
**Pixel N**

El número y arreglo de elementos de dispersión dentro de una célula de resolución varía de pixel en pixel.

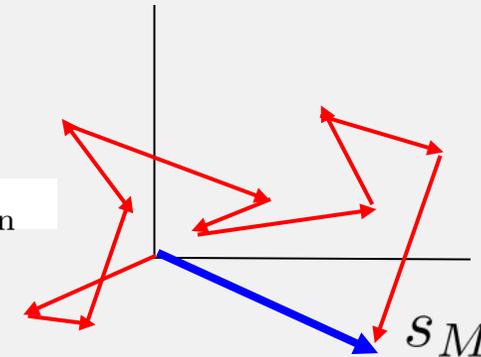
La señal retornada es una combinación coherente de los retornos de los diferentes elementos de dispersión.



**Pixel M**

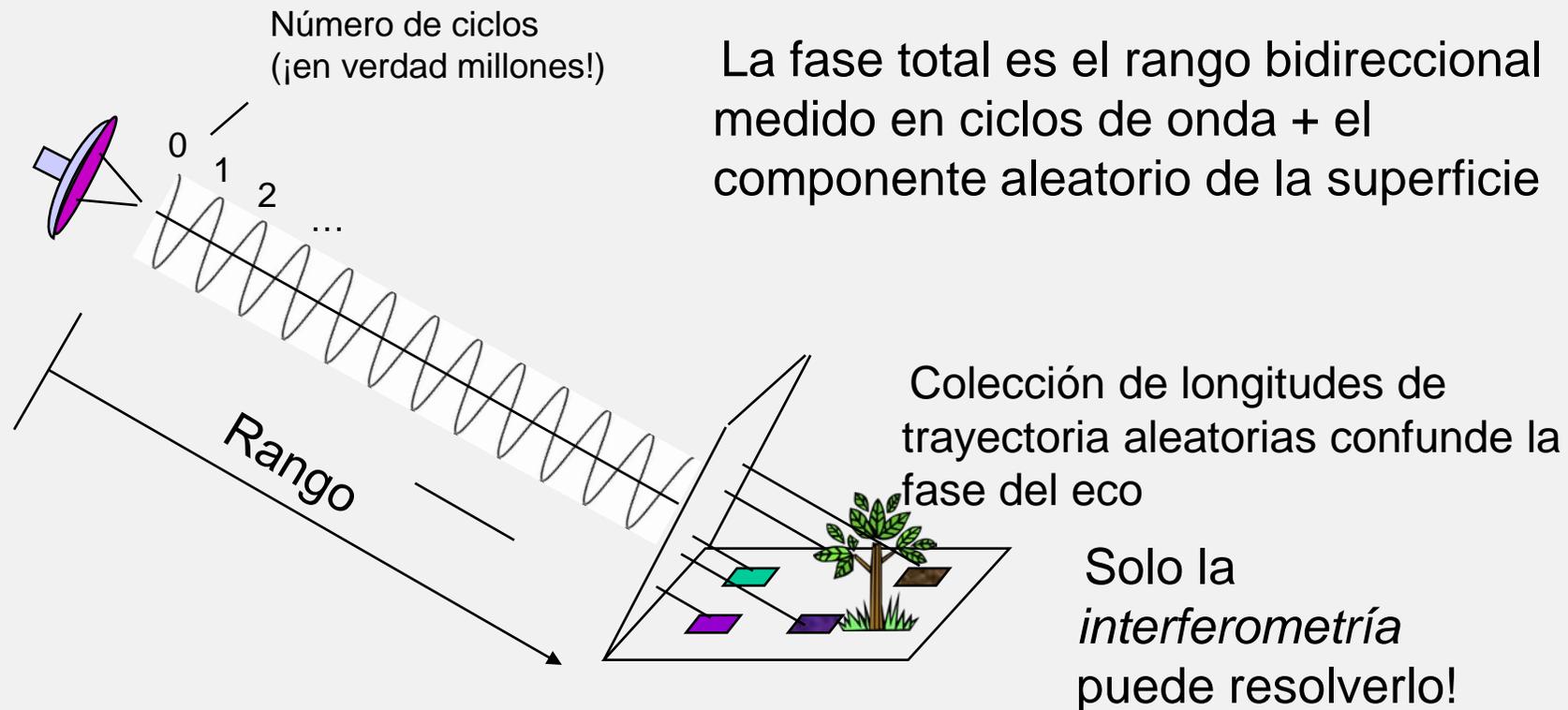


$$s = A \underbrace{e^{-\frac{4\pi i}{\lambda} \rho}}_{\text{Range Phase}} \underbrace{\sum_{k=1}^N a_k e^{-\frac{4\pi i}{\lambda} \Delta \rho_k}}_{\text{Scatterer Contribution}}$$



# Fase SAR – Una medida del rango y de la complejidad de la superficie

La fase de la señal de radar es el número de *ciclos de oscilación* que la onda ejecuta entre el radar y la superficie y de regreso.



Slide Courtesy of Paul Rosen (JPL)

# Vista simplística de la FASE SAR

Fase de imagen 1  $\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \rho_1 + \text{otras constantes} + n_1$

Fase de imagen 2  $\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \rho_2 + \text{otras constantes} + n_2$

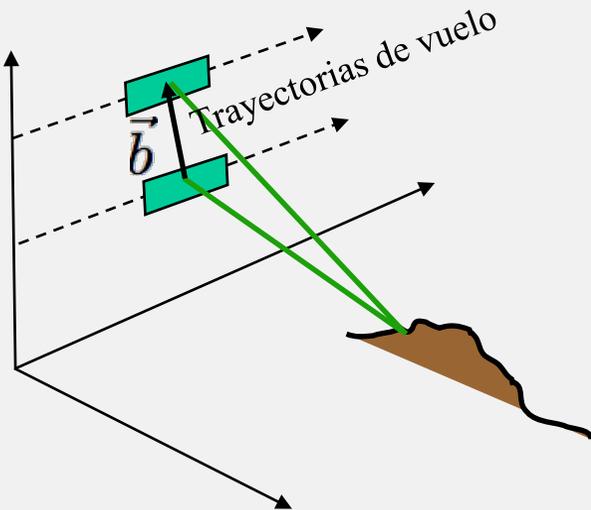
1. Los “otros constantes” no pueden ser determinados directamente.
2. Los “otras constantes” dependen de la distribución de la dispersión en la célula de resolución, la cual es desconocida y varía de una célula a otra.
3. La única forma de observar el cambio de rango es a través de la interferometría (cancelación de “otras constantes”).

Slide modified from Paul Rosen (JPL)

# Tipos de Interferometría de Radar

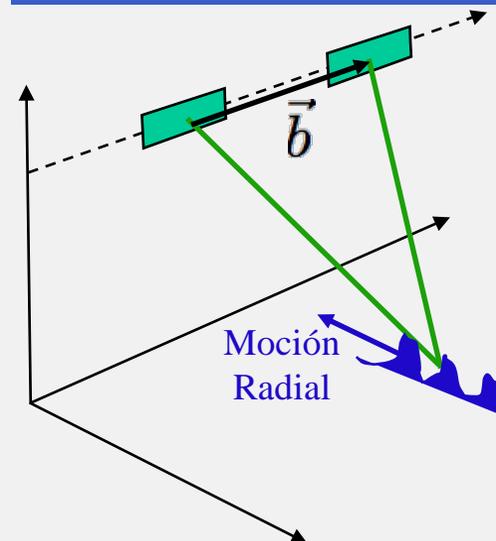
- Dos clases principales de radares interferométricos están separadas basados en la configuración geométrica del vector de base:
  - Los interferómetros se usan para mediciones topográficas cuando las antenas están separadas en la dirección transversal a la trayectoria
  - Los interferómetros se usan para medir la moción de la línea visual directa cuando las antenas están separadas en la dirección a lo largo de la trayectoria
  - Una sola antena repitiendo su recorrido puede formar un interferómetro para medir la deformación a largo plazo

## Interferómetro transversal al movimiento



- Interferómetros de dos antenas de un pase
- Interferómetros de una antena de pases repetidos  
==> Topografía y Deformación

## Interferómetro en la dirección de movimiento



- Interferómetro de dos antenas y un solo pase
- Separación a lo largo de la trayectoria  
==> Velocidad radial

Slide modified from Paul Rosen (JPL)

# Aplicaciones de la Interferometría SAR

- Mapeo/Cartografía
  - La interferometría de radar de plataformas aéreas se usa habitualmente para producir mapas topográficos tales como los modelos de elevación (digital elevation models o DEMs).
    - Exactitud de posición circular de 2 a 5 metros
    - Paso de muestreo y resoluciones de 5 a 10 metros
    - Produce DEMs de 10 km por 80 km en una hora en una mini-supercomputadora
  - Las imágenes de radar son automáticamente geocodificadas, combinándose fácilmente con otros conjuntos de datos (multiespectrales).
  - Las aplicaciones topográficas son habilitadas por el mapeo interferométrico rápido
    - Gestión y clasificación de uso de la tierra, evaluación de riesgos, inteligencia, planificación urbana, geología a corta y larga escala, hidrología
- Mapeo de deformación y detección de cambios
  - La Interferometría de radar de pasos repetidos desde plataformas espaciales se usa habitualmente para producir mapas de *cambios* topográficos como modelos de desplazamiento digitales (digital displacement models o DDMs).
    - Exactitud de desplazamiento relativo de 0.3 a 1 centímetro
    - Paso de muestreo y resolución de 10 a 100 m
    - Produce DDMs de 100 km por 100 km rápidamente una vez que los datos están disponibles
  - Aplicaciones incluidas
    - Monitoreo y modelado sísmico y volcánico, deslizamientos de tierra y hundimiento
    - Dinámica de glaciares y capas de hielo
    - Deforestación, detección de cambios y monitoreo de desastres

Slide modified from Paul Rosen (JPL)

# Interferometría Topográfica

Diferencia de fase medida:

$$\otimes \phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \delta\rho$$

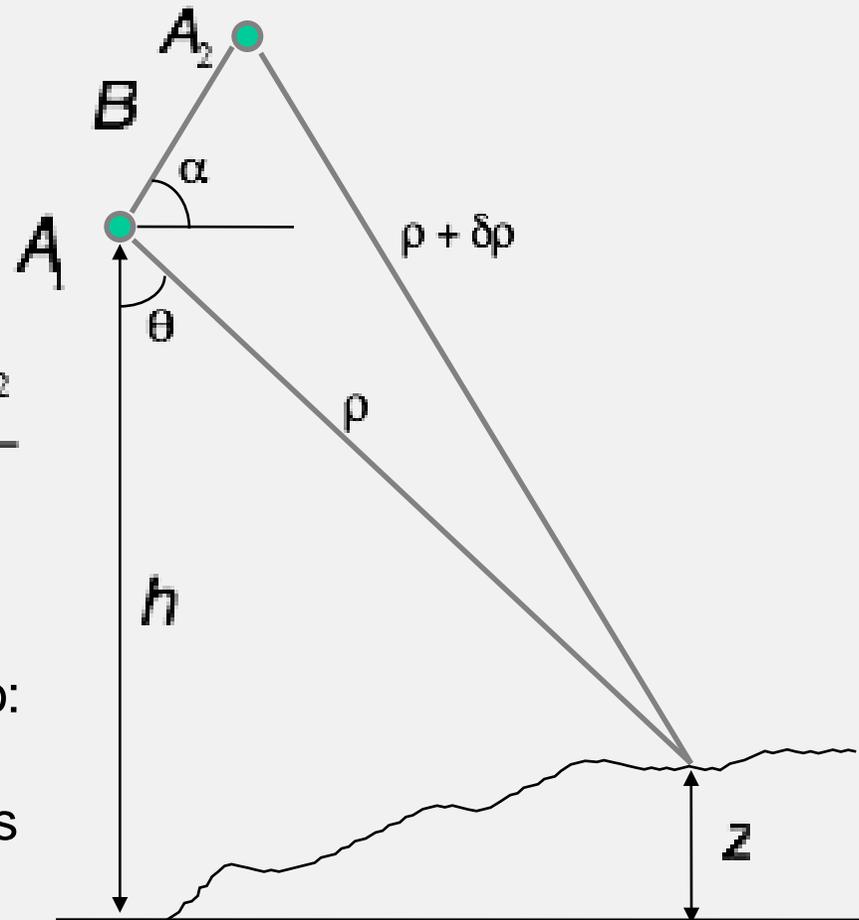
Triangulación:

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{(\rho + \delta\rho)^2 - \rho^2 - B^2}{2\rho B}$$

$$z = h - \rho \cos\theta$$

Conocimiento crítico para el interferómetro:

- Base, ( $B, \alpha$ ) a milímetros
- Diferencias de fase de sistema en grados



Slide modified from Paul Rosen (JPL)

# Opciones de recolección de datos

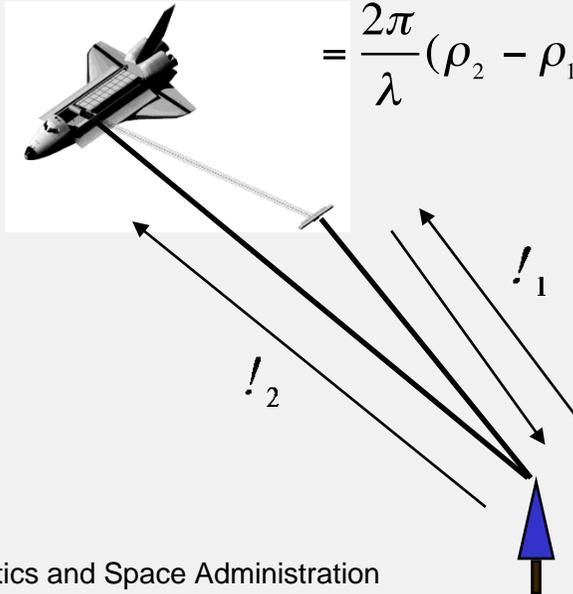
Para la interferometría de pase único (single pass interferometry o SPI) ambas antenas están posicionadas en la misma plataforma, lo cual es ideal para la medición topográfica. Hay dos modos de recolección de datos comunes:

- *modo de transmisión de antena singular* – una antena transmite y recibe
- *modo ping-pong* – cada antena transmite y recibe sus propios ecos, efectivamente doblando la base física.

## Clásico

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_2 + \rho_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_1 + \rho_1)$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_2 - \rho_1)$$



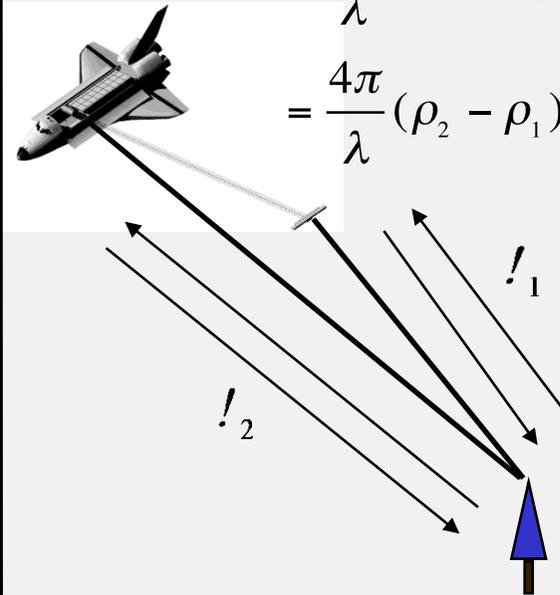
$$\Delta\phi = \frac{2\pi p}{\lambda} \delta\rho,$$

$$p = 1$$

## Ping-Pong

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_2 + \rho_2) - \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_1 + \rho_1)$$

$$= \frac{4\pi}{\lambda}(\rho_2 - \rho_1)$$

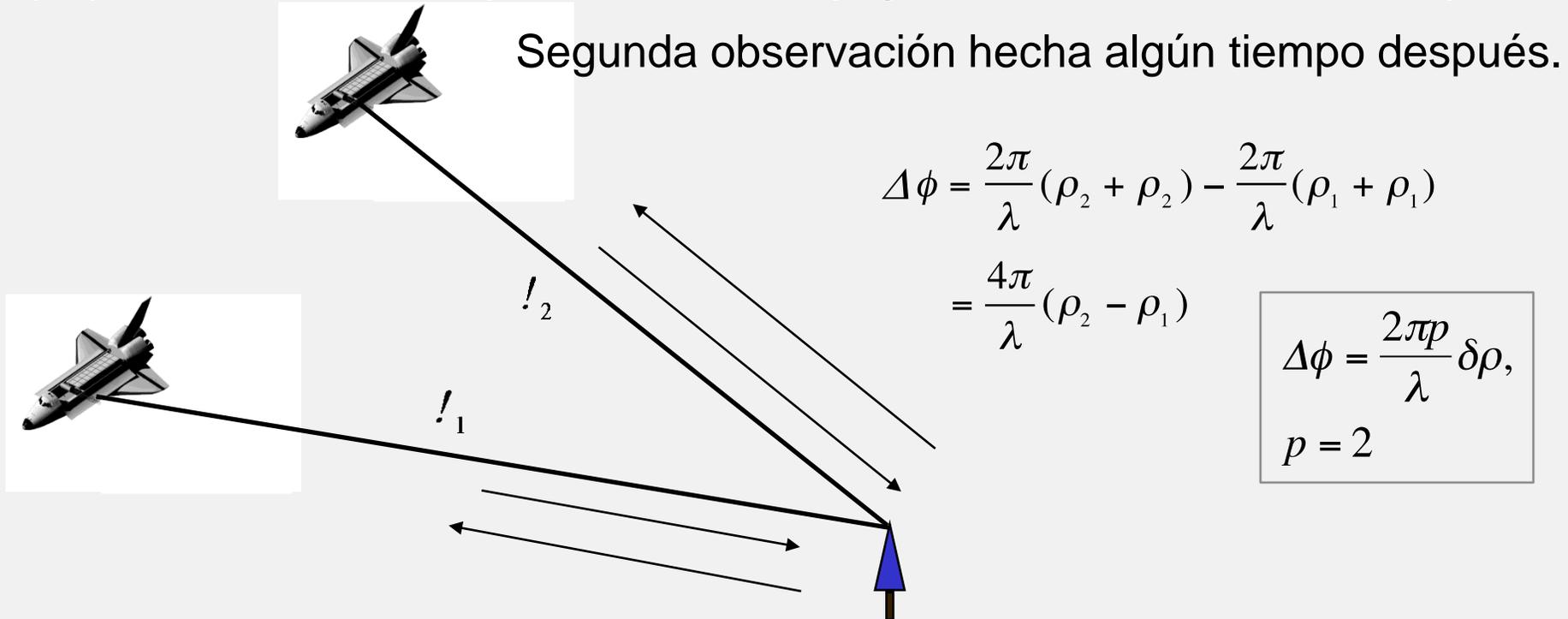


$$\Delta\phi = \frac{2\pi p}{\lambda} \delta\rho,$$

$$p = 2$$

# Opciones de recolección de datos II

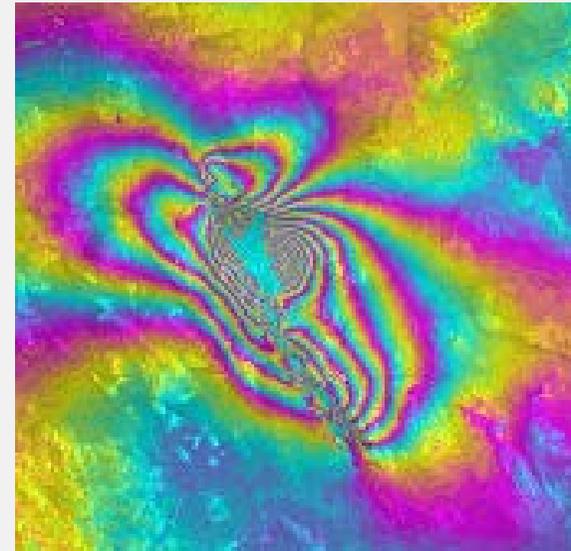
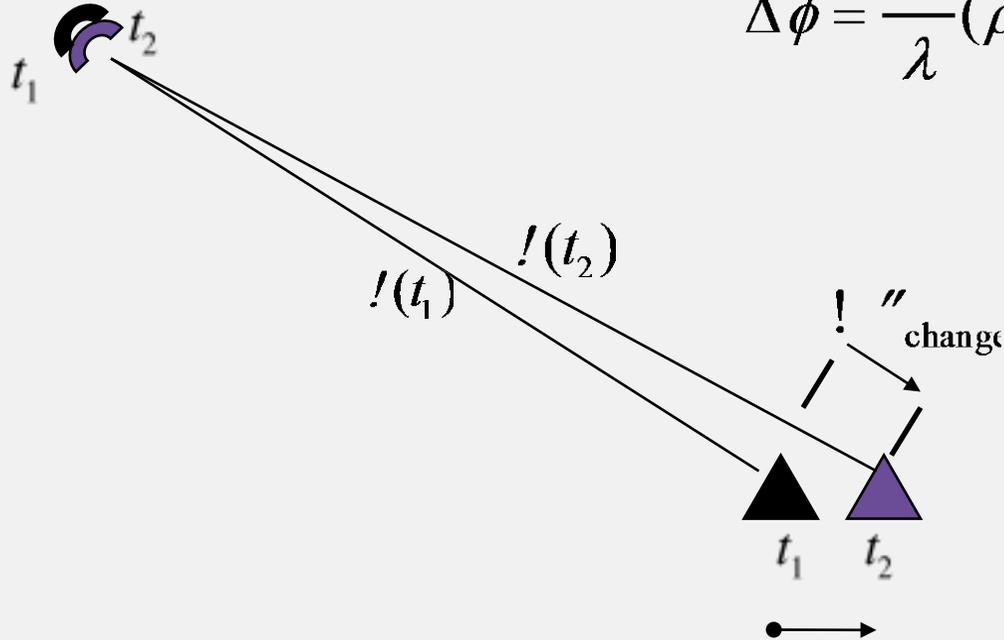
Los datos interferométricos también pueden ser recopilados en el modo de pases repetidos (repeat pass o RPI). En este modo, se producen dos observaciones de radar en proximidad espacial separadas en el tiempo. El intervalo temporal puede ser de segundos hasta años. Las dos observaciones pueden ser producidas por diferentes sensores con tal de tener parámetros de sistemas de radar casi idénticos. Los datos de este tipo pueden ser utilizados para mediciones topográficas o de deformaciones superficiales.



# Interferometría Diferencial

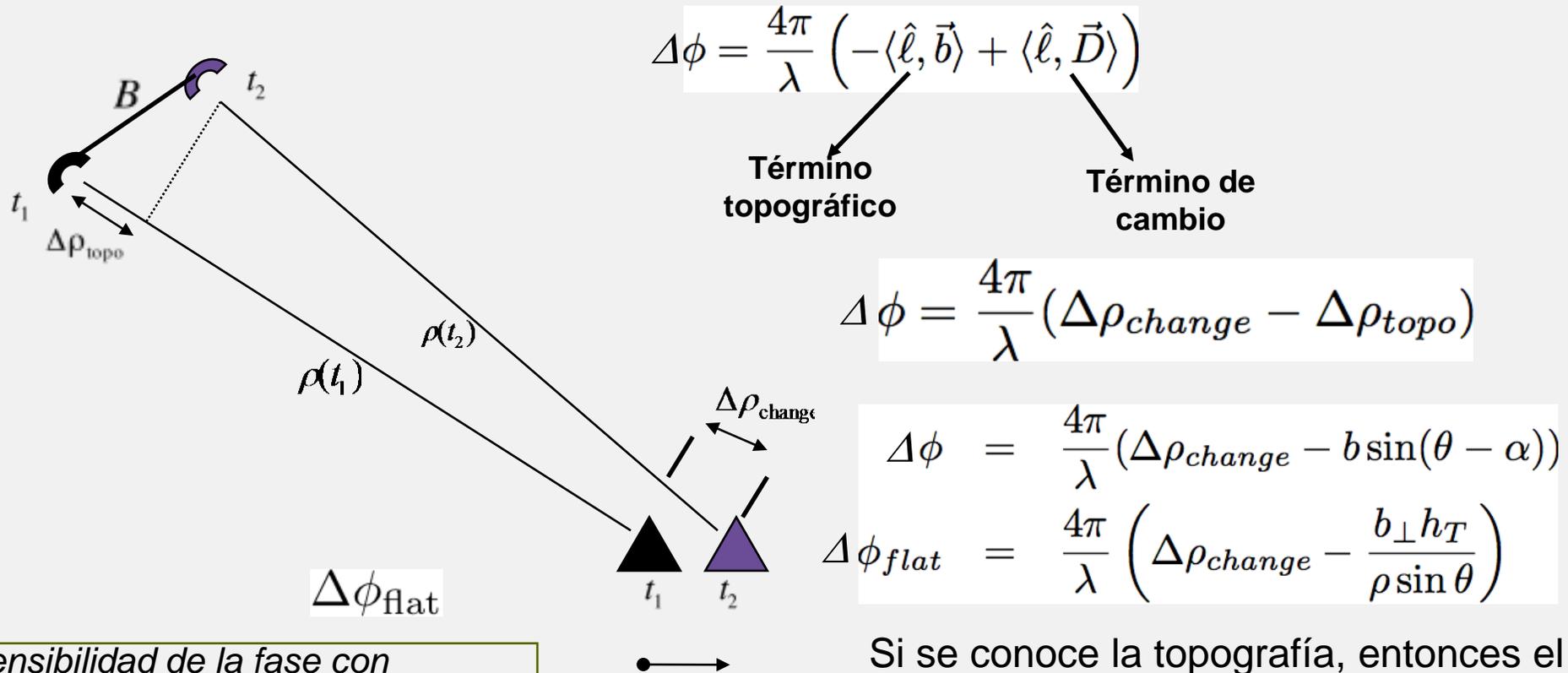
Cuando se hacen dos observaciones de la misma ubicación en el espacio pero en diferentes momentos, la fase interferométrica es directamente proporcional a cualquier cambio en el rango de un atributo de la superficie.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(\rho(t_1) - \rho(t_2)) = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta\rho_{\text{change}}$$



# Interferometría Diferencial y Topografía

- Por lo general, se hacen dos observaciones de diferentes lugares en el espacio y en diferentes momentos, así que la fase interferométrica es proporcional a la topografía y al cambio topográfico.



*Nota: La sensibilidad de la fase con respecto al cambio es mucho mayor que aquella con respecto al relieve topográfico.*

Si se conoce la topografía, entonces el segundo término puede ser eliminado para revelar cambios en la superficie

# Sensibilidades Interferométricas Diferenciales

- La razón por la que la interferometría diferencial puede detectar deformación superficial milimétrica es que la fase diferencial es mucho más sensible a desplazamientos que a la topografía.

$$\frac{\partial \phi}{\partial h} = \frac{2\pi \rho b \cos(\theta - \alpha)}{\lambda \rho \sin \theta} = \frac{2\pi \rho b_{\perp}}{\lambda \rho \sin \theta}$$

Sensibilidad Topográfica

$$(\phi \Leftrightarrow \Delta\phi) \quad \frac{\partial \phi}{\partial \Delta\rho} = \frac{4\pi}{\lambda}$$

Sensibilidad a Desplazamiento

$$\sigma_{\phi_{topo}} = \frac{\partial \phi}{\partial h} \sigma_h = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{b_{\perp}}{\rho \sin \theta} \sigma_h$$

Término de Sensibilidad Topográfica

$$\sigma_{\phi_{disp}} = \frac{\partial \phi}{\partial \Delta\rho} \sigma_{\Delta\rho} = \frac{4\pi}{\lambda} \sigma_{\Delta\rho}$$

Término de Sensibilidad a Desplazamiento

$$\text{Since } \frac{b}{\rho} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_{\phi_{disp}}}{\sigma_{\Delta\rho}} \gg \frac{\sigma_{\phi_{topo}}}{\sigma_h}$$

Medición Topográfica, Escala Métrica – Cambio Topográfico, Escala Milimétrica

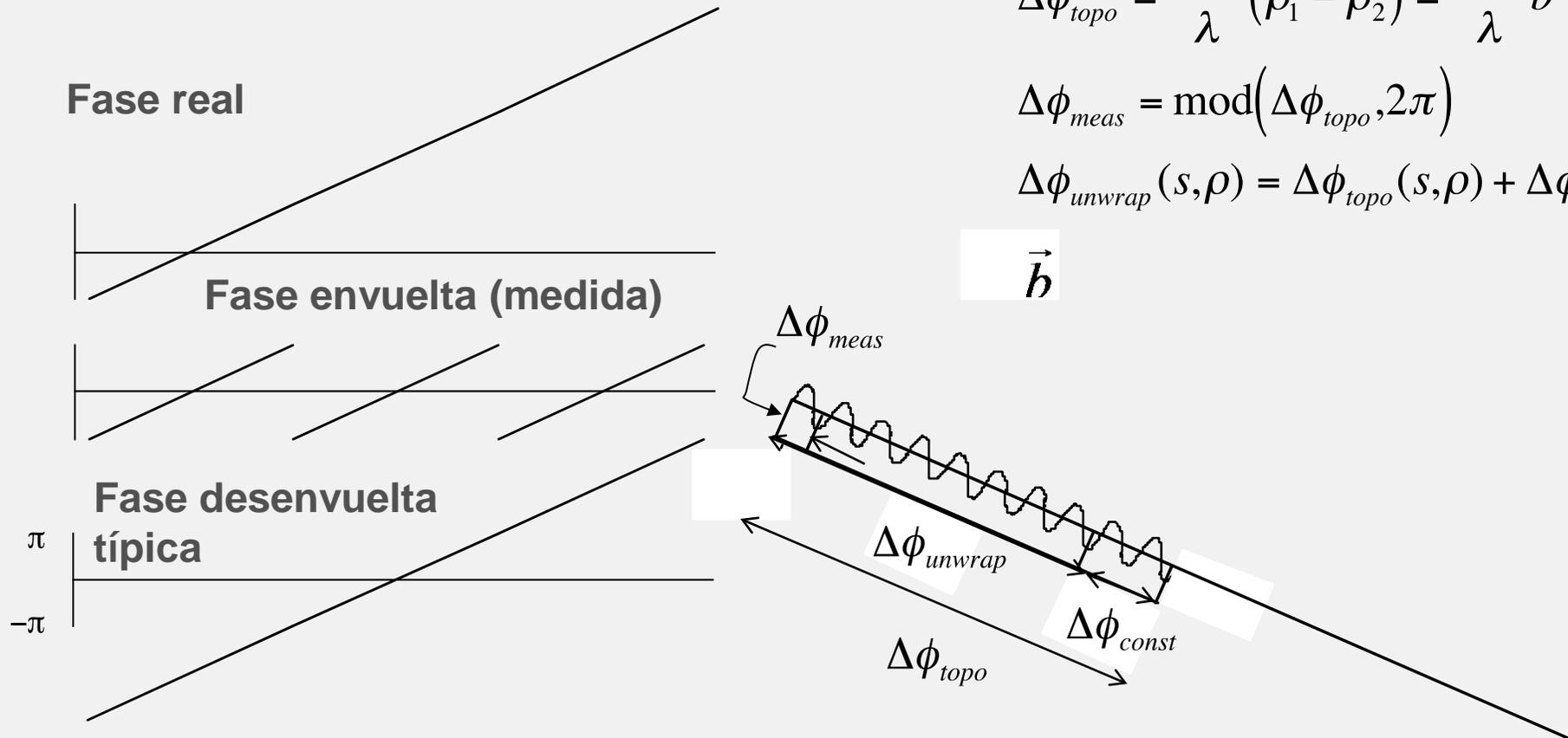
# Desenvolvimiento de Fase

De la fase medida y envuelta, desenvuelva la fase de algún punto de comienzo arbitrario, después determine la “ambigüedad” de fase  $2\pi$  correcta.

$$\Delta\phi_{topo} = \frac{2\pi p}{\lambda} (\rho_1 - \rho_2) = \frac{2\pi p}{\lambda} \vec{b} \cdot \vec{l}$$

$$\Delta\phi_{meas} = \text{mod}(\Delta\phi_{topo}, 2\pi)$$

$$\Delta\phi_{unwrap}(s, \rho) = \Delta\phi_{topo}(s, \rho) + \Delta\phi_{const}$$



# Teoría de Correlación\*

- Las señales InSAR se decorrelacionan (se vuelven incoherentes) debido a
  - Ruido termal y de procesores
  - Dispersión Diferencial Geométrica y Volumétrica
  - Rotación de la Geometría de Visualización
  - Movimientos aleatorios a través del tiempo
- La decorrelación está relacionada con la desviación del estándar de la fase local de la fase del interferograma
  - Afecta la exactitud de altitud y desplazamiento
  - Afecta la habilidad de desenvolver la fase

\*“Correlación” y “Coherencia” a menudo se usan como sinónimos

# Componentes correlativos de InSAR

- Los efectos de correlación se multiplican, a diferencia de los efectos de fase que se suman
- Una baja coherencia o decorrelación por cualquier motivo causa una pérdida de información en esa área

$$\gamma = \gamma_v \gamma_g \gamma_t \gamma_c$$

donde

$\gamma_v$  es volumétrico (árboles)

$\gamma_g$  es geométrico (pendientes empinadas)

$\gamma_t$  es temporal (cambios graduales)

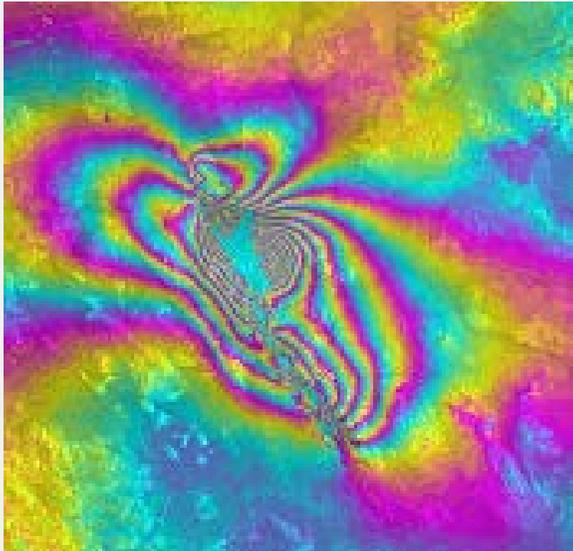
$\gamma_c$  es cambios repentinos



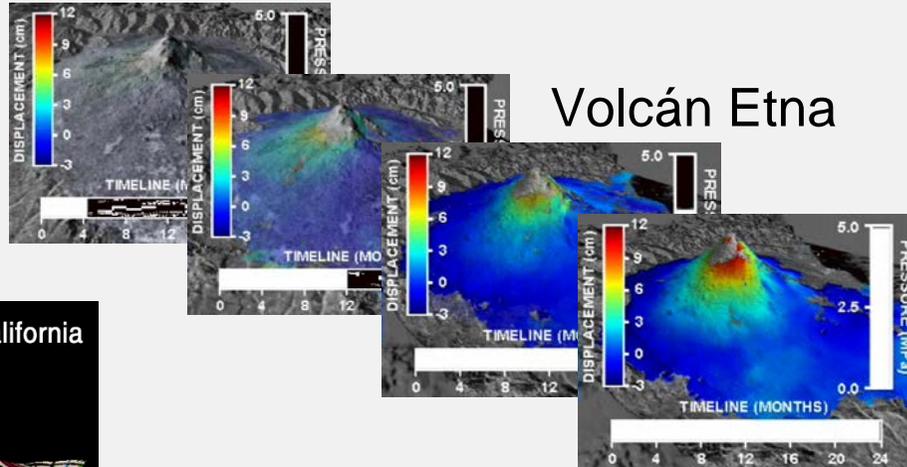
# Aplicaciones de InSAR

---

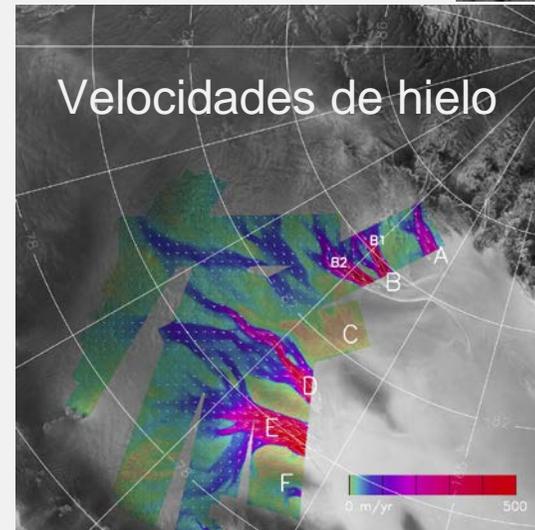
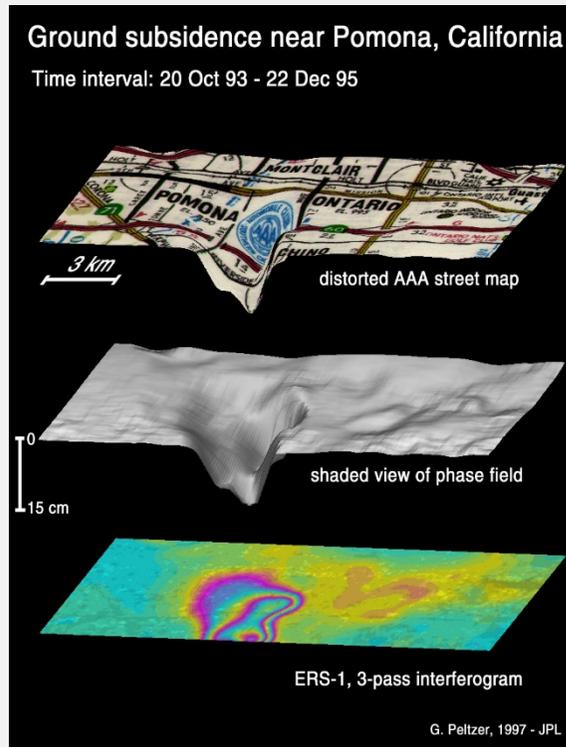
# Algunos Ejemplos de Deformación



Terremoto en la mina Hector



Volcán Etna



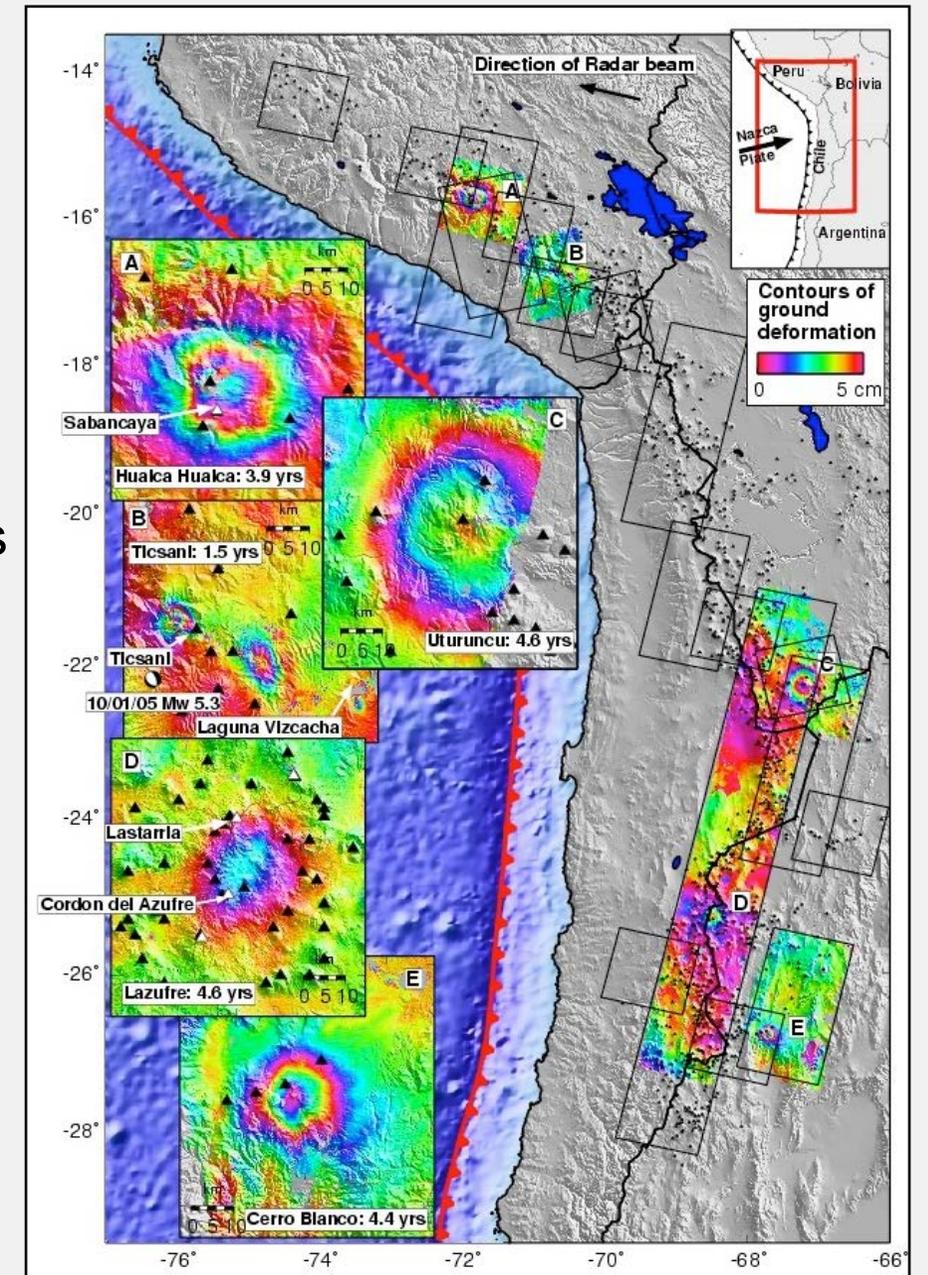
Joughin et al, 1999

Slide modified from Paul Rosen (JPL)

Applied Remote Sensing Training Program

# Volcanes del Ande central

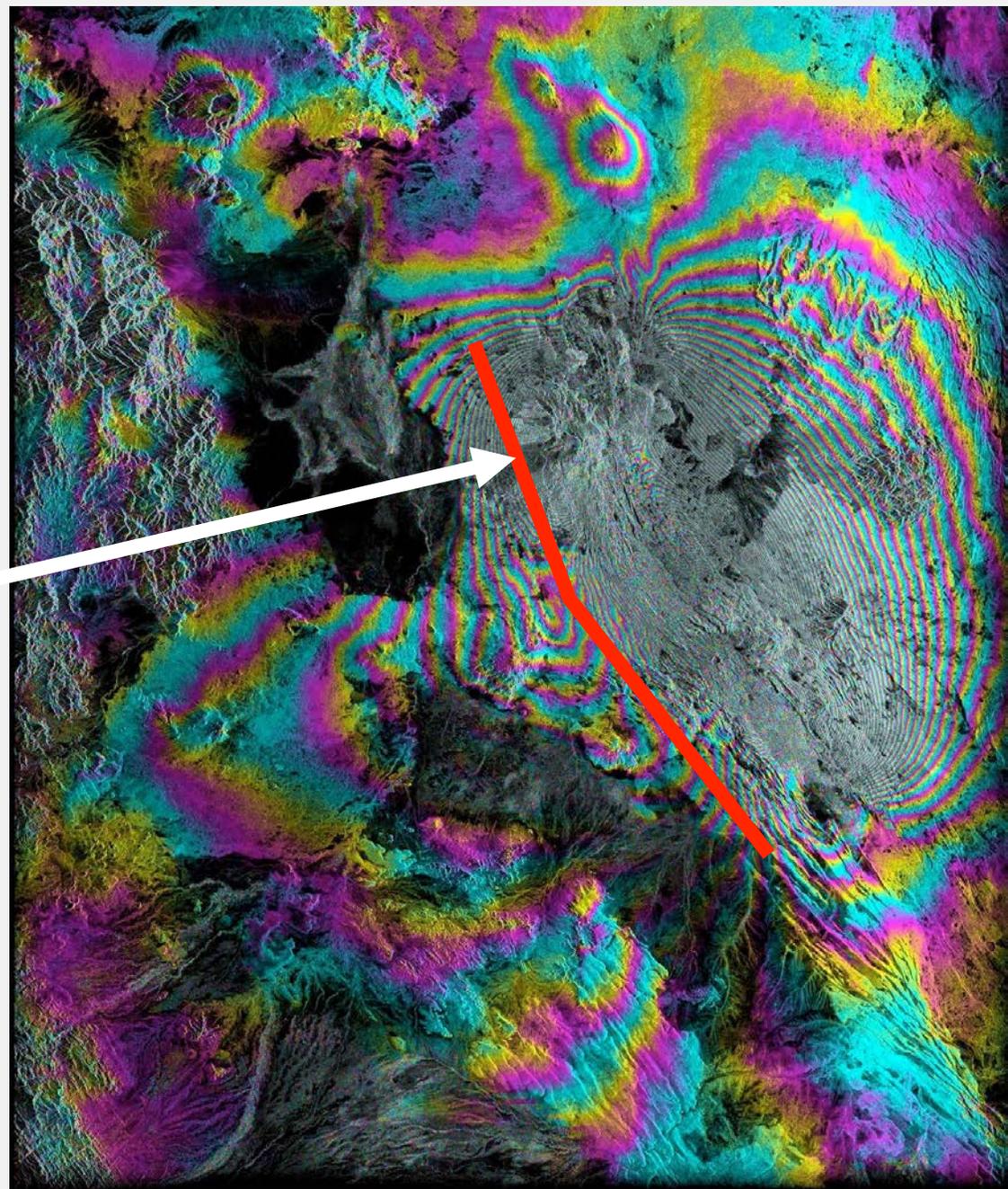
- Mapa de deformaciones en y alrededor de volcanes
- Satélites europeos ERS-1 y ERS-2 (banda C)
- Algunas deformaciones relacionadas con erupciones recientes
- Otros no se sabían que estaban activos actualmente
- M. Pritchard (ahora en la Universidad de Cornell)



# Inyección de Fluidos en el Rift Asal

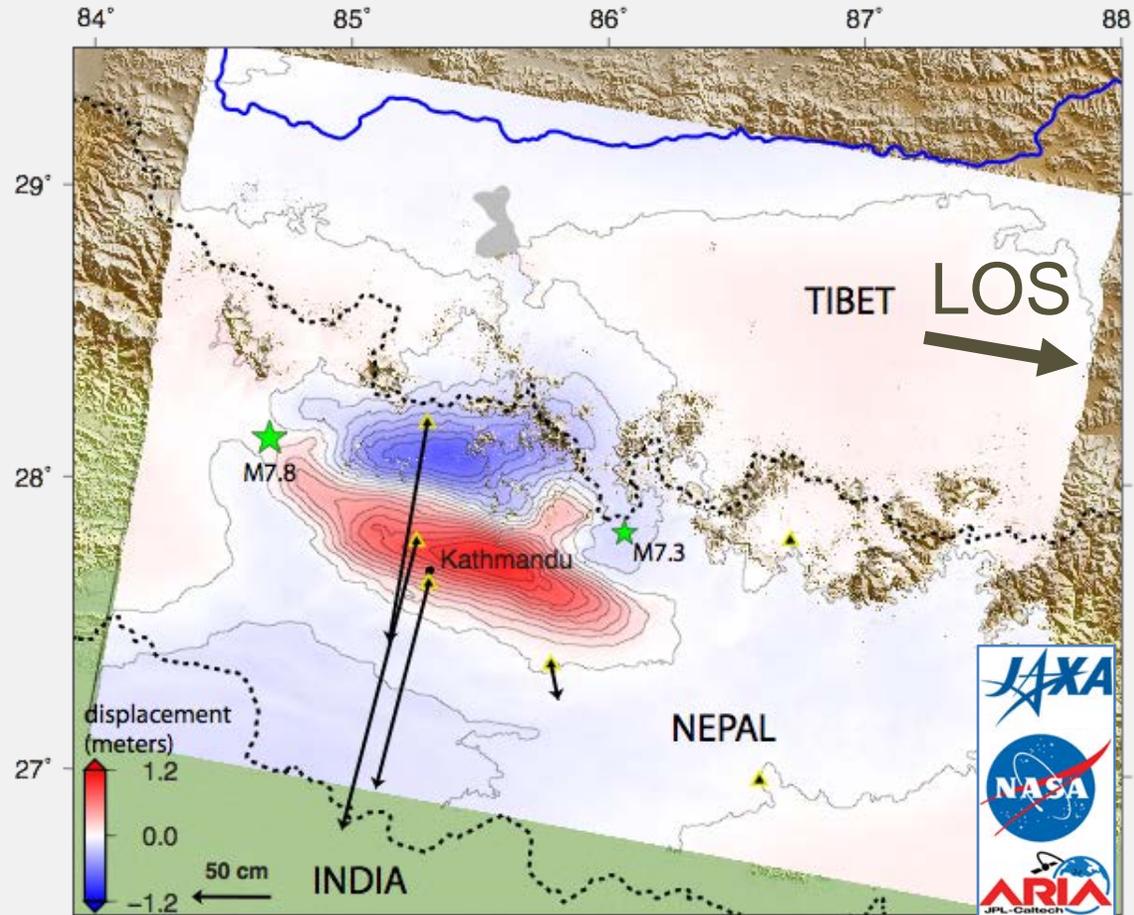


6 de mayo – 28 de oct. de 2005;  
de Tim Wright, U. de Leeds



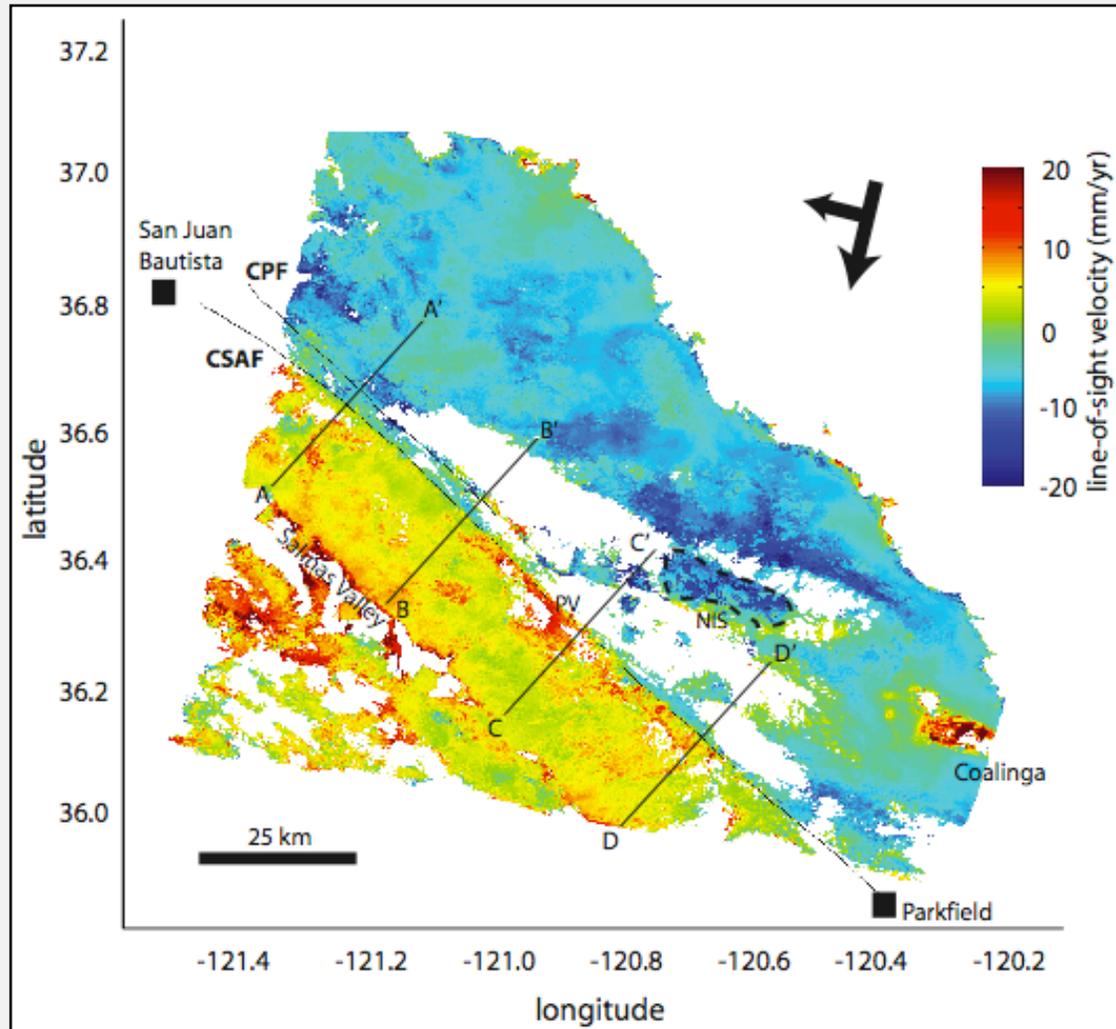
# 2015- Terremoto M7.8 en Gorkha, Nepal

- Interferograma ALOS-2 ScanSAR
- Línea visual (line-of-sight o LOS) descendiente perpendicular al plano horizontal
- Fase InSAR sólo ve el componente vertical
- El Alto Himalaya bajó hasta 1.2 m
- Yue, H., et al. (2016, in press), Depth varying rupture properties during the 2015 Mw 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2016.07.005.



GPS data from Galetzka, J., et al. (2015), Slip pulse and resonance of the Kathmandu basin during the 2015 Gorkha earthquake, Nepal, *Science*, 349(6252), 1091-1095

# Arrastre en la Falla de San Andrés

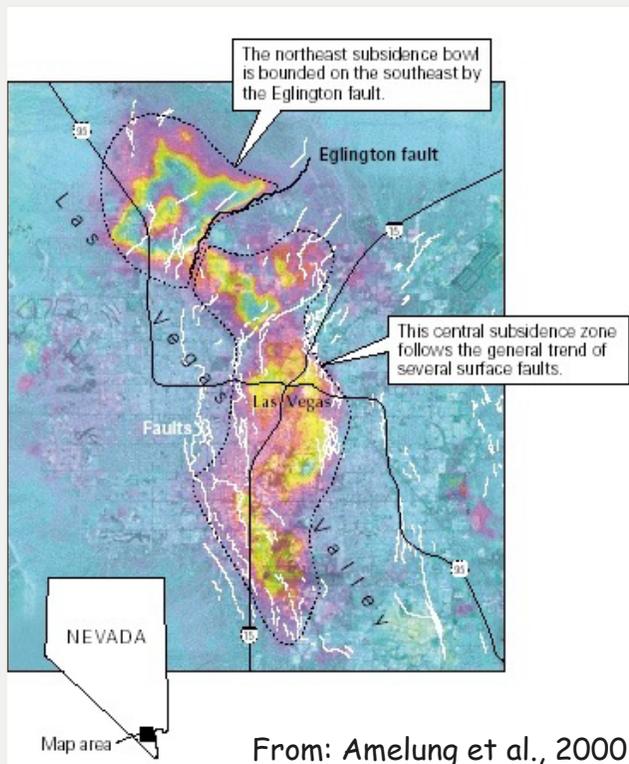


Superposición de 12 interferogramas ERS cubriendo desde mayo de 1992 hasta enero de 2001

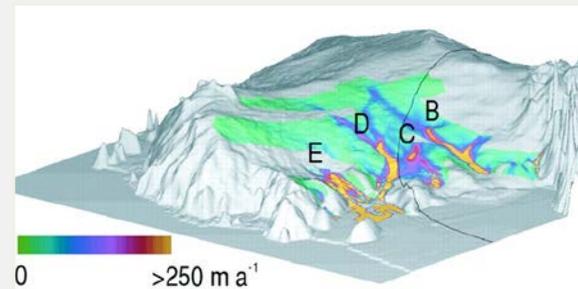
Figuras de Isabelle Ryder  
UC Berkeley

# Algunos de los Mayores Éxitos de InSAR's

Los altibajos de Las Vegas  
(Debido a la extracción de aguas subterráneas)



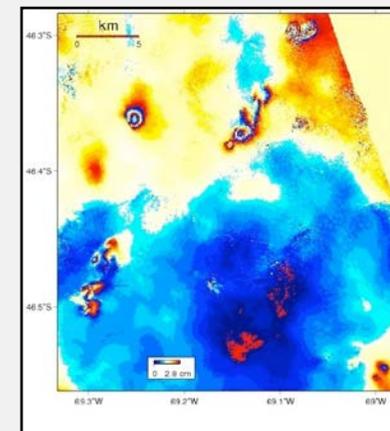
Velocidades de flujos de hielo en Antártica de InSAR/rastreo



From: Bamber et al., 2000

Detección mejorada de recuperación de petróleo en el Golfo de San Jorge, Argentina

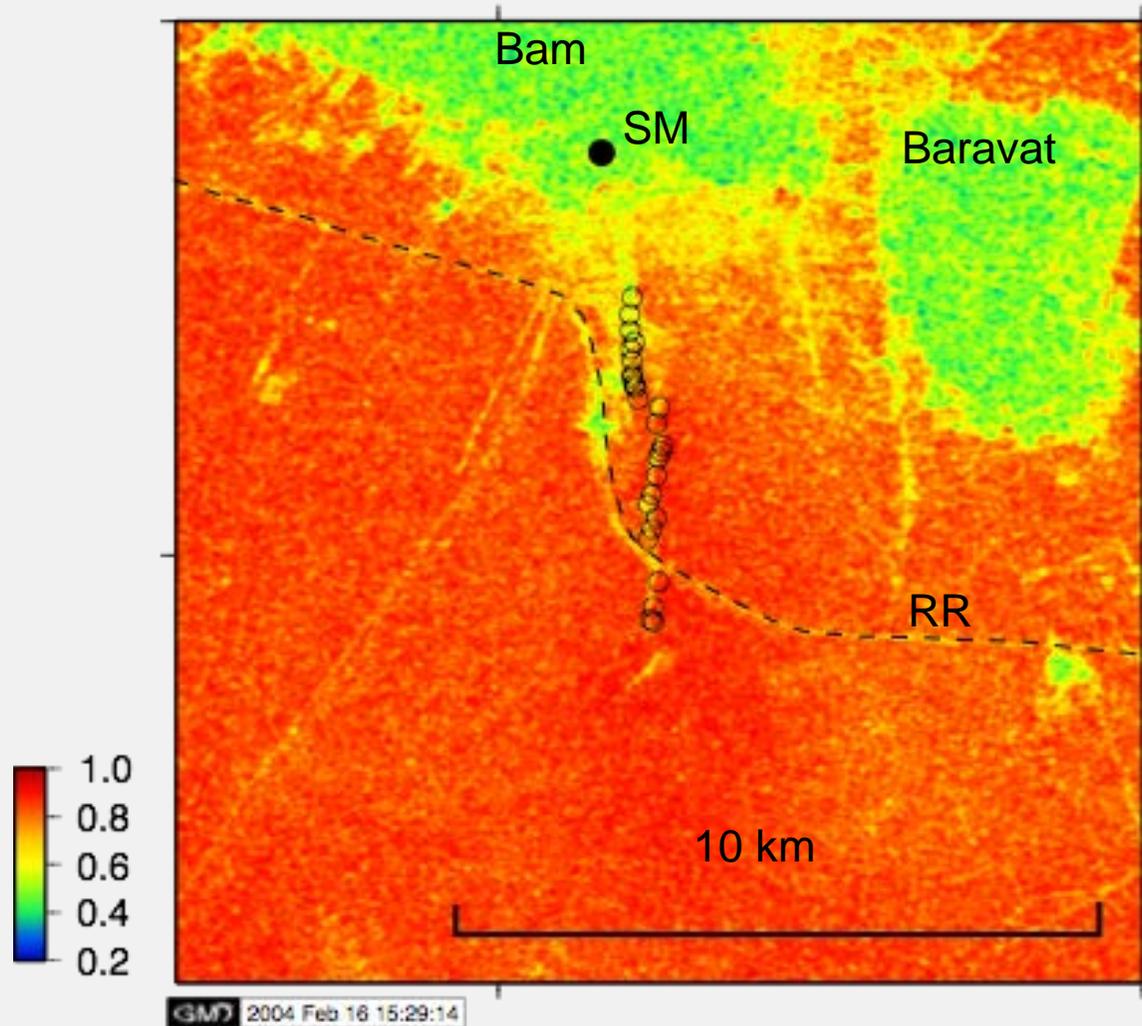
Interferograma Envisat cubre 2004-2006



Slide modified from Matt Pritchard (Cornell)

# Decorrelación muestra rupturas superficiales

2003--  
Terremoto  
M6.5 en  
Bam, Irán



35 días  
2003/12/3 –  
2004/1/7

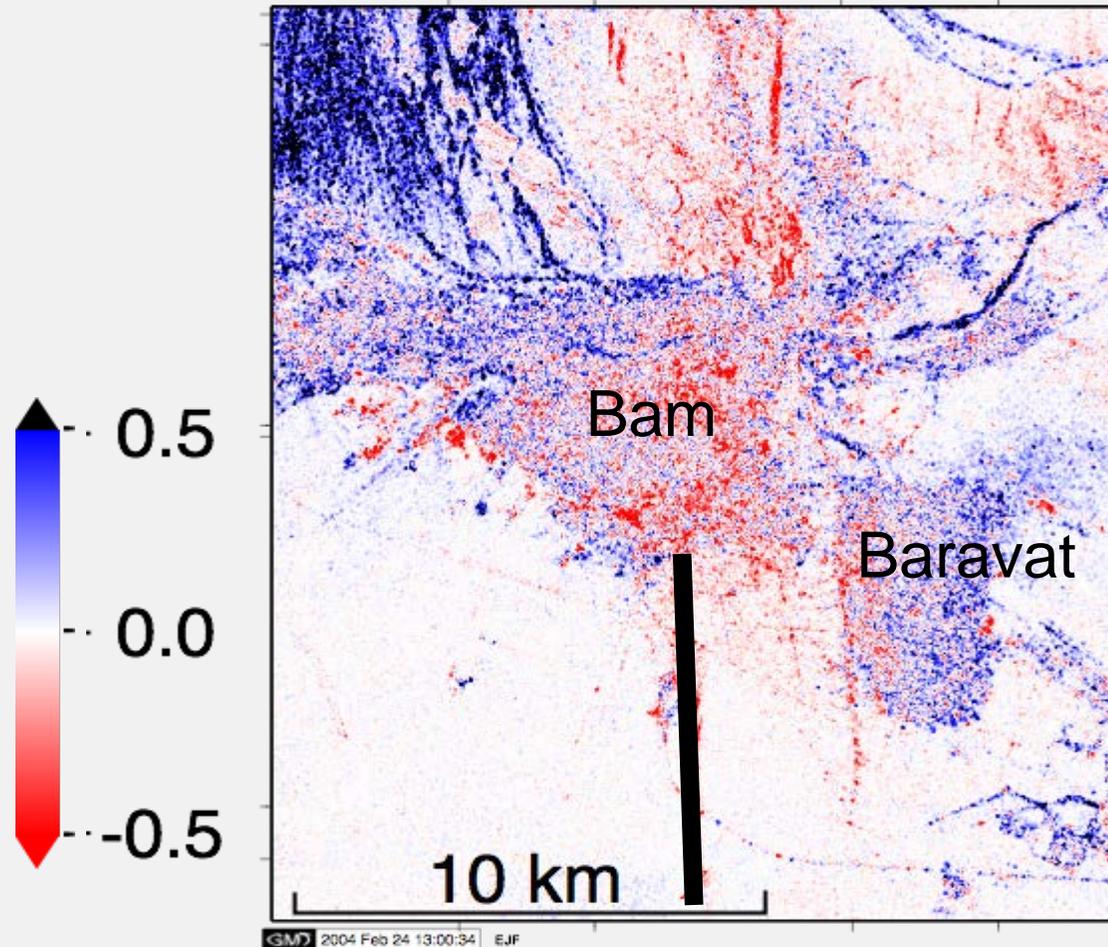
Envisat

Trayectoria  
descendiente

Bperp 580 m

Fielding, E. J., M. Talebian, P. A. Rosen, H. Nazari, J. A. Jackson, M. Ghorashi y R. Walker (2005), Rupturas en la superficie y daños a edificios del terremoto de Bam, Irán de 2003 mapeados por correlación interferométrica de radar de apertura sintética. *J. Geophys. Res.*, 110(B3), B03302, doi:10.1029/2004JB003299.

# Cambio de correlación

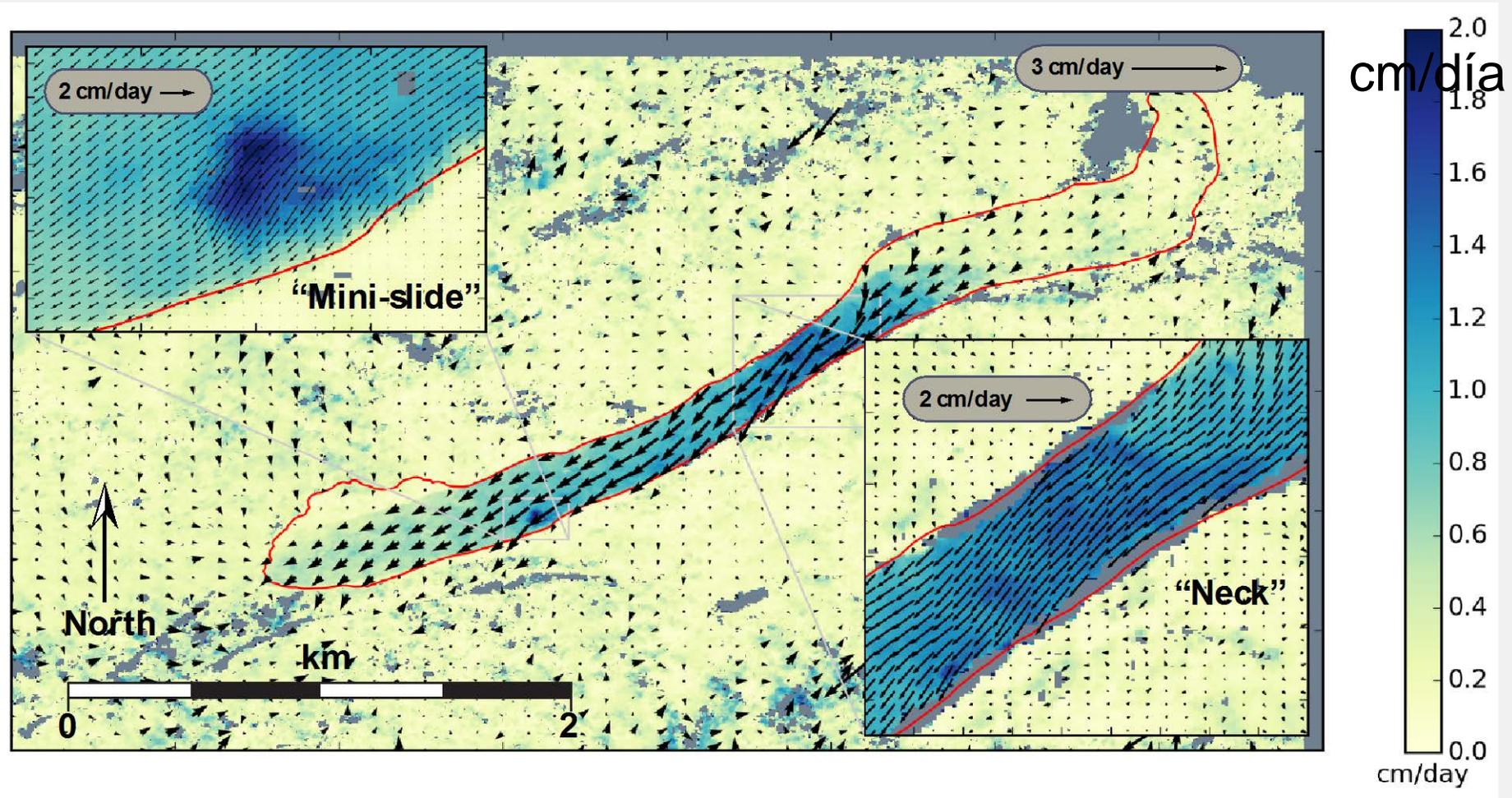


Correlación  
co-sísmica  
menos  
correlación  
pre-sísmica

lo rojó es  
decorrelación  
co-sísmica

# Movimiento de Deslizamientos de Tierras

Combinación de cuatro líneas de vuelo de NASA UAVSAR InSAR



Delbridge, B. G., R. Bürgmann, E. Fielding, S. Hensley, and W. H. Schulz (2016), Three-dimensional surface deformation derived from airborne interferometric UAVSAR: Application to the Slumgullion Landslide, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121(5), 3951--3977, doi:10.1002/2015JB012559.

# Misión NASA-ISRO SAR (NISAR)

- Resolución espacial alta con tiempo de revisita frecuente
- Lanzamiento anticipado más pronto: 2021
- SAR de doble frecuencia– SAR de Banda L y Banda S
  - L-band SAR de la NASA y S-band SAR de ISRO
- 3 años de operaciones científicas (+ de 5 años de productos)
- Todos los datos científicos se harán gratis y libremente disponibles
- <http://nisar.jpl.nasa.gov>

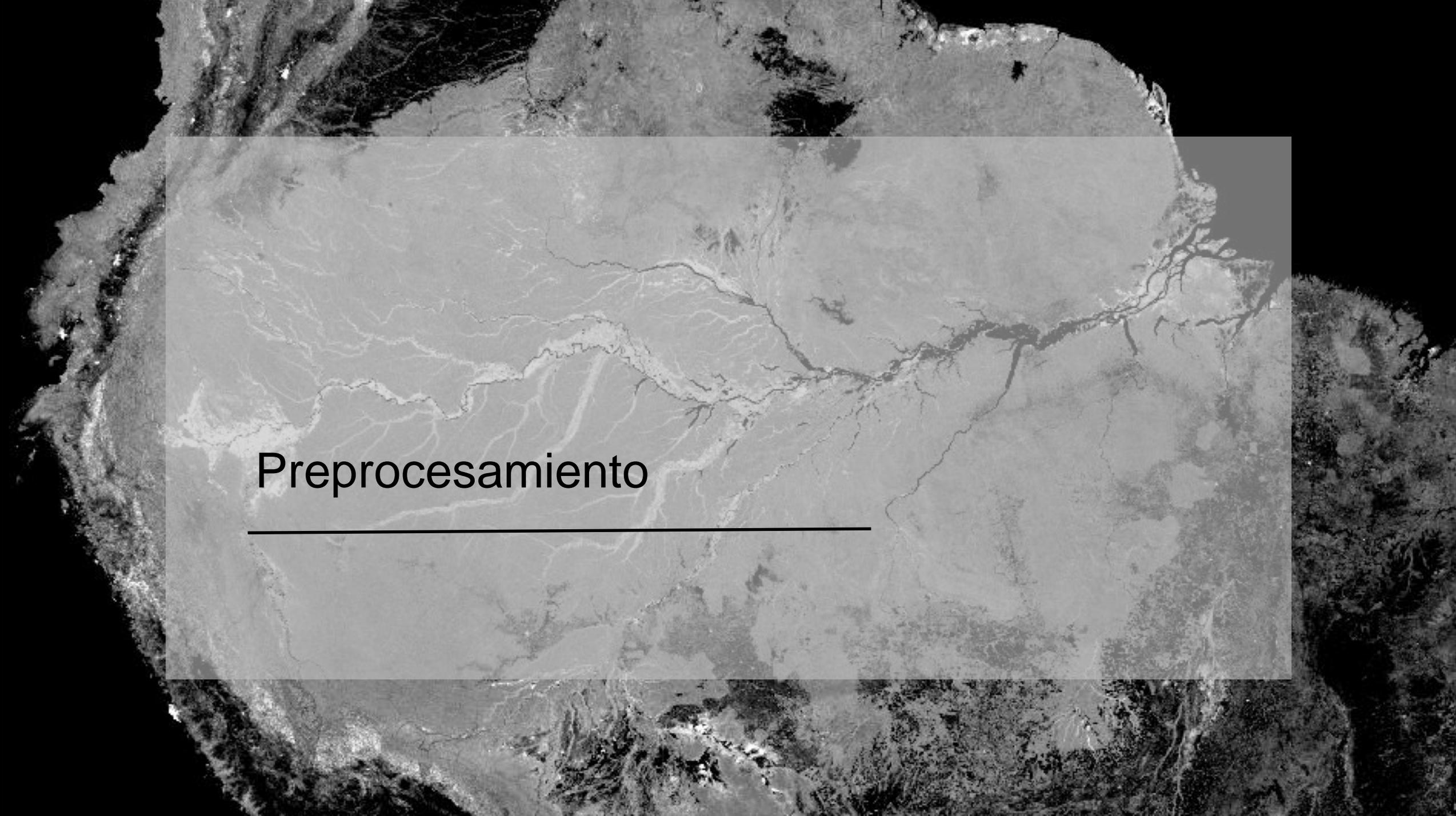
Slide Courtesy of Paul Rosen (JPL)

NISAR Characteristic:	Would Enable:
L-band (24 cm wavelength)	Low temporal decorrelation and foliage penetration
S-band (12 cm wavelength)	Sensitivity to light vegetation
SweepSAR technique with Imaging Swath >240 km	Global data collection
Polarimetry (Single/Dual/Quad)	Surface characterization and biomass estimation
12-day exact repeat	Rapid Sampling
3-10 meters mode-dependent SAR resolution	Small-scale observations
3 years since operations (5 years consumables)	Time-series analysis
Pointing control < 273 arcseconds	Deformation interferometry
Orbit control < 500 meters	Deformation interferometry
>30% observation duty cycle	Complete land/ice coverage
Left/Right pointing capability	Polar coverage, North and South
Noise Equivalent Sigma Zero ≤ -23 db	Surface characterization of smooth surfaces

A grayscale Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometric image showing a complex terrain with a network of linear features, likely rivers or roads, and various textured areas representing different land cover types. The image is centered on a semi-transparent white rectangular box containing text.

# Cómo Acceder, Abrir y Visualizar Imágenes Interferométricas SAR

---

An aerial grayscale photograph of a river network. A semi-transparent gray rectangular box is overlaid on the center of the image. The word "Preprocesamiento" is written in black text within this box, with a horizontal line underneath it.

Preprocesamiento

---