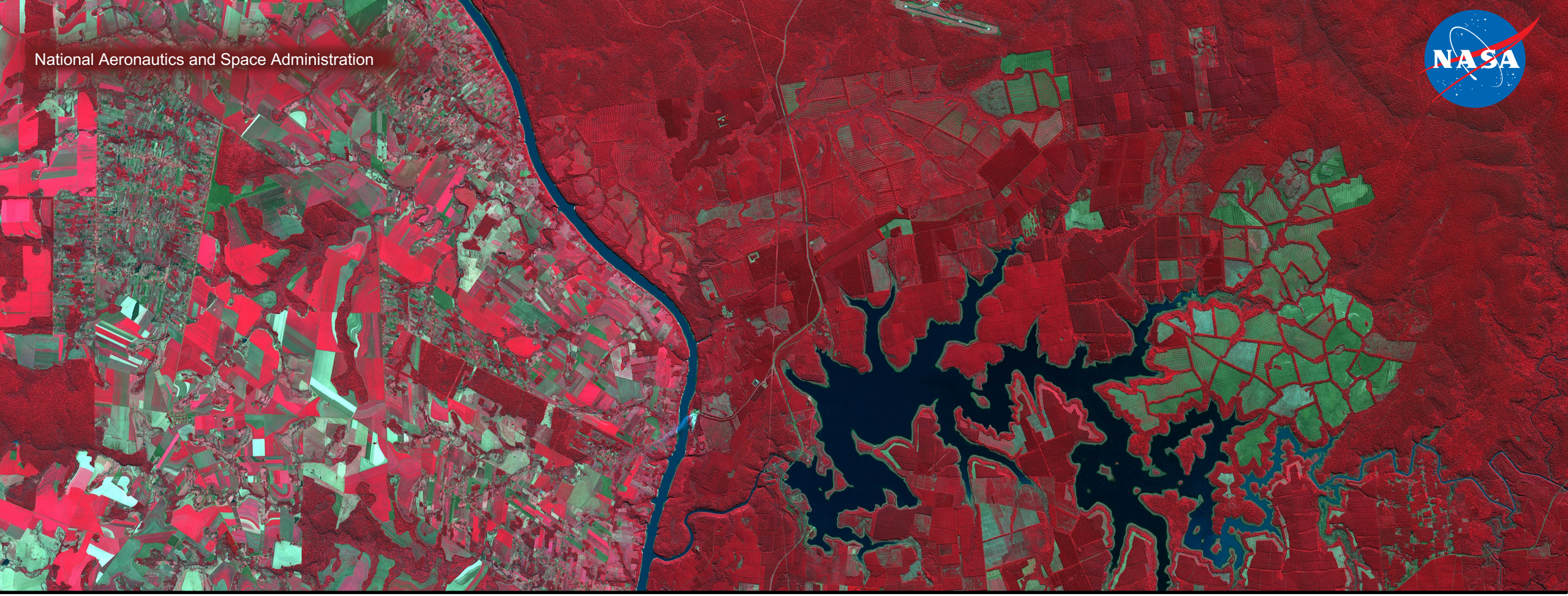


Introducción a la Interferometría SAR

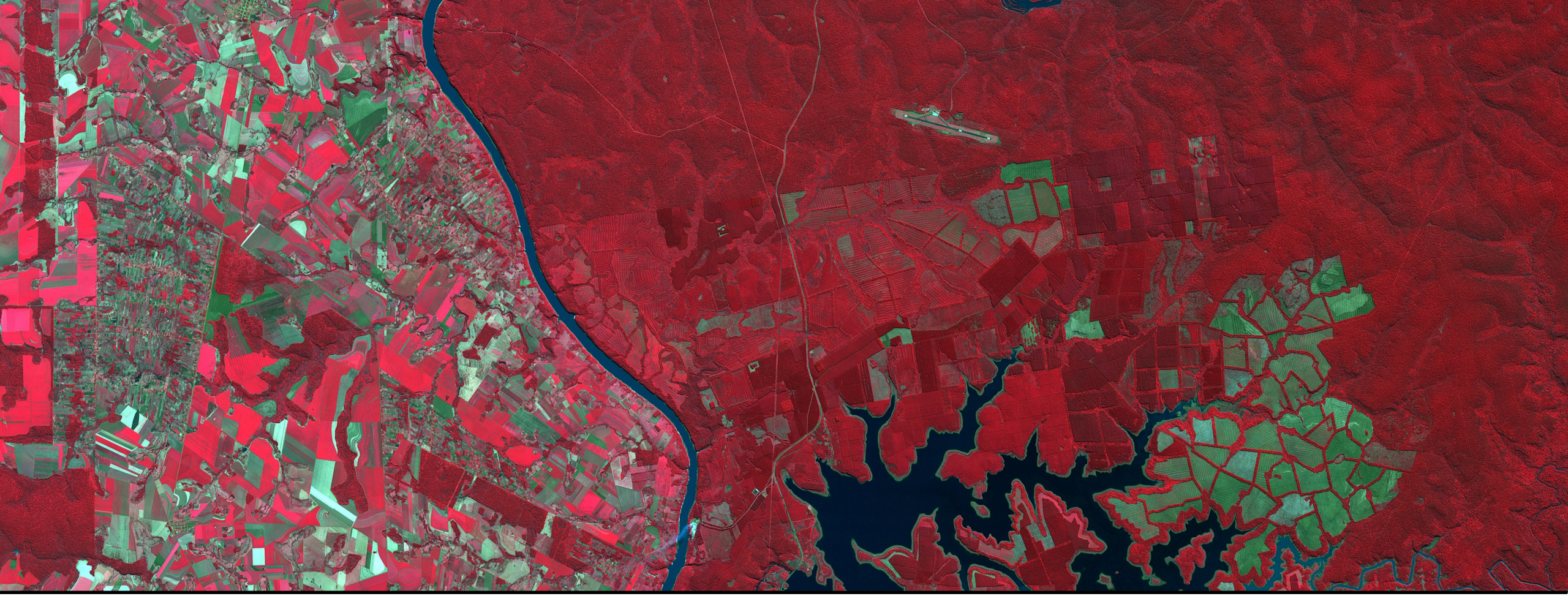
Erika Podest

30 de Noviembre 2017

Objetivos de Aprendizaje

Al finalizar esta presentación los participantes podrán:

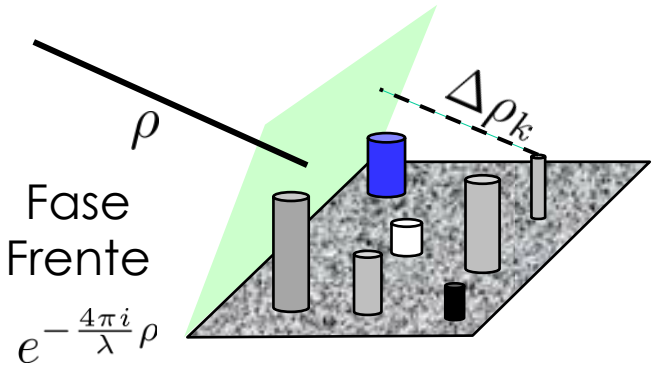
- Entender la física básica de la interferometría SAR
- Describir lo que la fase interferométrica SAR nos dice acerca de la superficie terrestre
- Describir el preprocesamiento de datos que se necesita
- Entender el contenido informático en las imágenes SAR interferométricas



Teoría Interferométrica de SAR

Imágenes SAR y Speckle

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

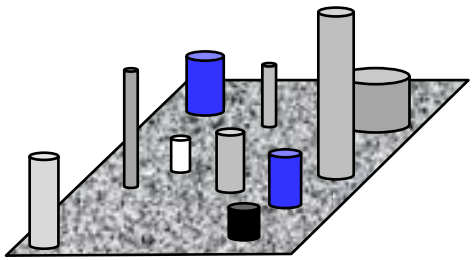


Pixel N

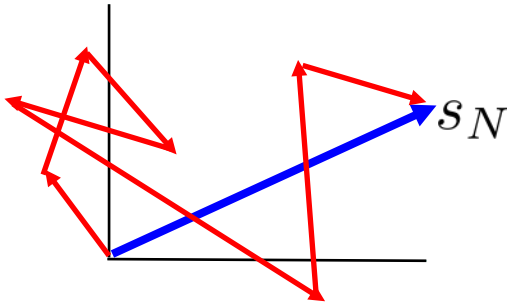
El número y arreglo de elementos de dispersión dentro de una célula de resolución varía de pixel en pixel.

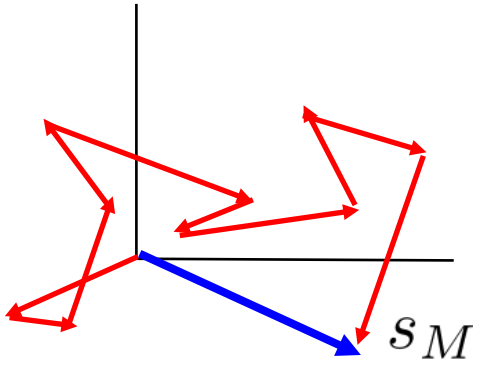
La señal de retorno es una combinación coherente de los retornos de los diferentes elementos de dispersión.

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



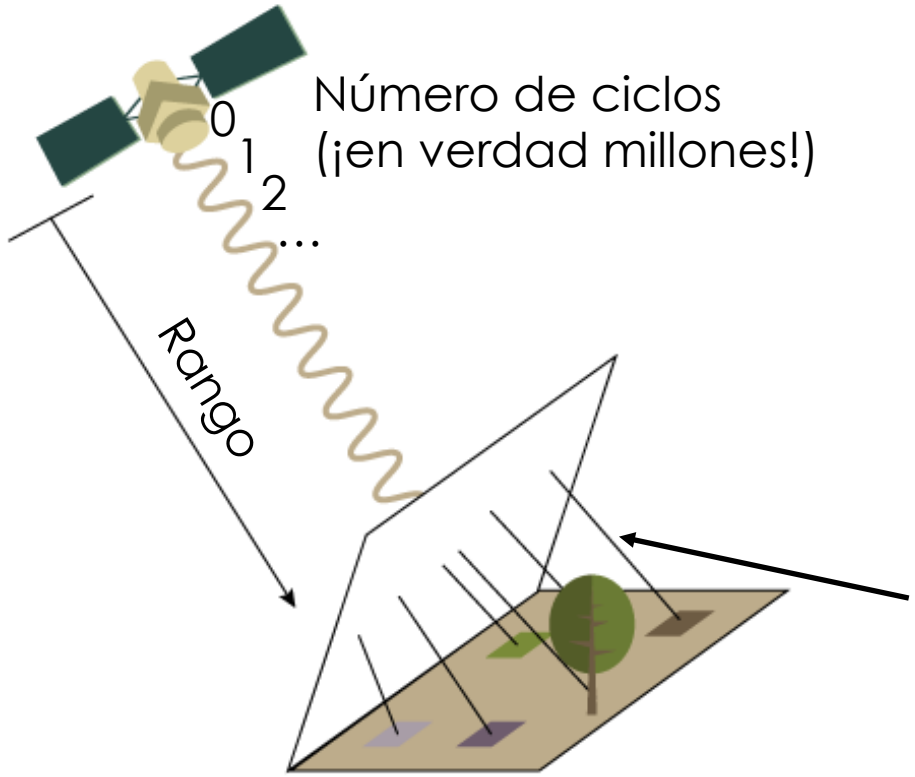
Pixel M





Diapositiva cortesía de Paul Rosen (JPL)

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
- La fase total es el rango bidireccional medido en ciclos de onda + el componente aleatorio de la superficie
- La recolección de longitudes de trayectoria aleatorias confunde la fase del eco
- ¡Solo la interferometría puede resolverlo!

Slide courtesy of Paul Rosen (JPL)

Vista simplística de la FASE SAR

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

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

1. Las “otras constantes” no se pueden determinar directamente
2. Las “otras constantes” dependen de la distribución de la dispersión en la célula de resolución, la cual es desconocida y varía de célula en célula
3. La única forma de observar el cambio de rango es a través de la interferometría (cancelación de las “otras constantes”)

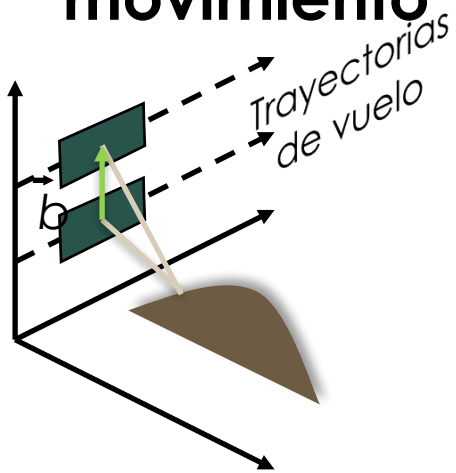
Slide modified from Paul Rosen (JPL)

Tipos de Interferometría de Radar

- Dos clases principales de radares interferométricas están separadas basado 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

Tipos de Interferometría de Radar

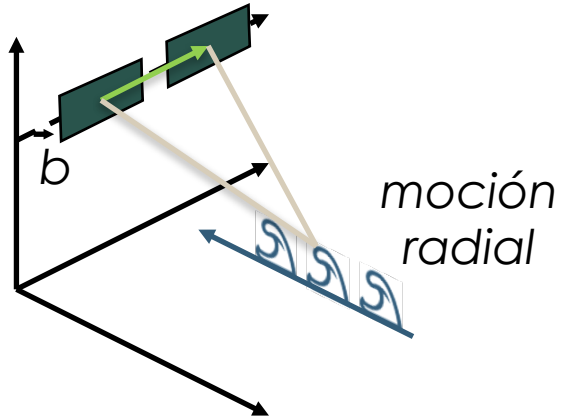
Interferómetro transversal al movimiento



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

Slide modified from Paul Rosen (JPL)

Interferómetro en la dirección del movmiento



- Interferómetros de dos antenas de un solo pase
- Separación a lo largo de la trayectoria
  - **Velocidad radial**

Aplicaciones de la Interferometría SAR: Mapeo y Cartografía

- La interferometría de radar de plataformas aéreas se usa habitualmente para producir mapas topográficos, por ejemplo los modelos de elevación digitales (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 posibles gracias al mapeo interferométrico rápido
  - Gestión y clasificación del uso del suelo, evaluación de riesgos, inteligencia, planificación urbana, geología a corta y larga escala, hidrología

Slide modified from Paul Rosen (JPL)

Aplicaciones de la Interferometría SAR: 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 los 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:

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

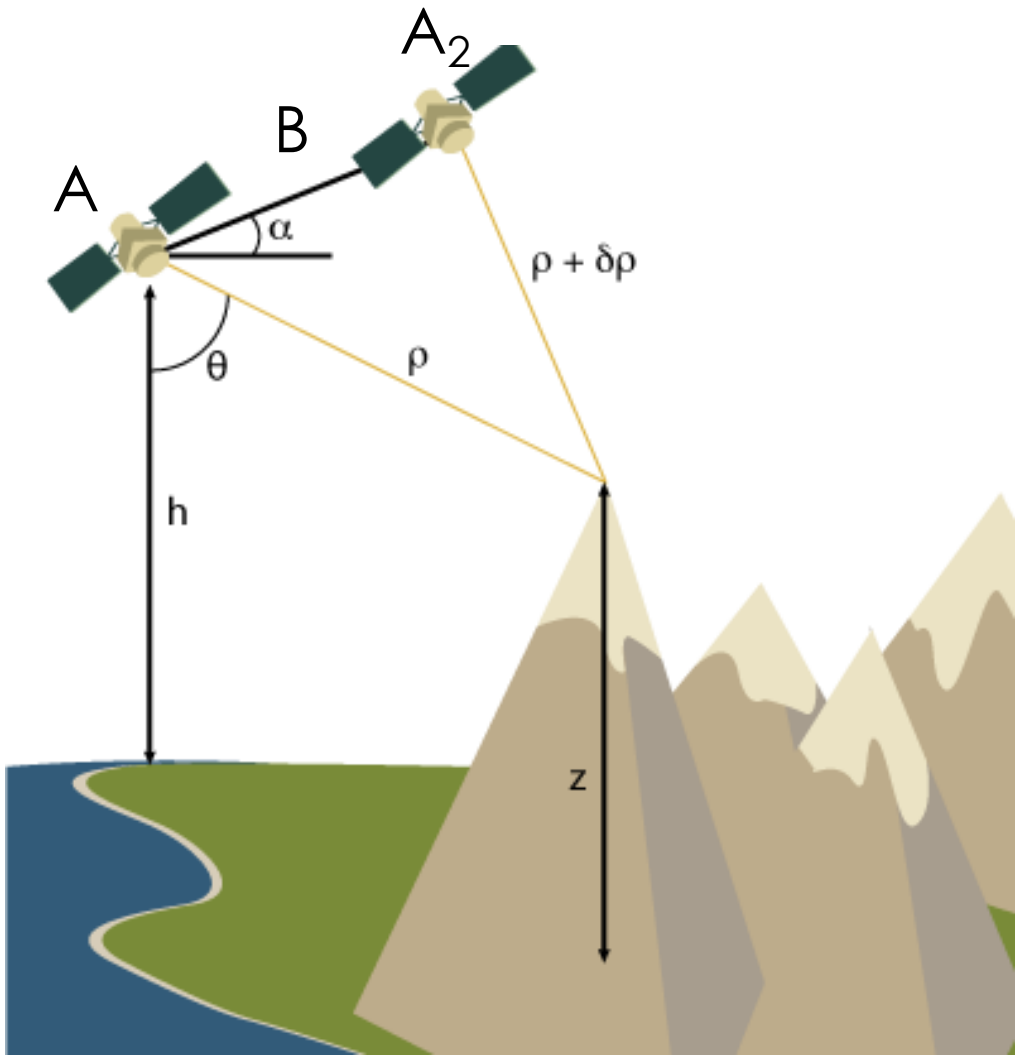
Triangulación

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

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

Conocimiento crítico para el interferómetro:

- base (B,α) en milímetros
- Diferencias de fase de sistema en grados



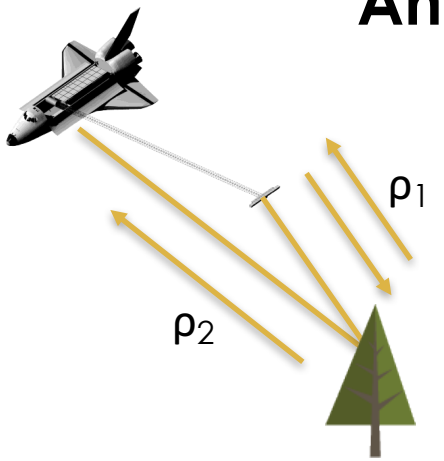
Slide modified from Paul Rosen (JPL)

Opciones para la recolección de datos

Para la interferometría de un solo pase (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

Antena Singular



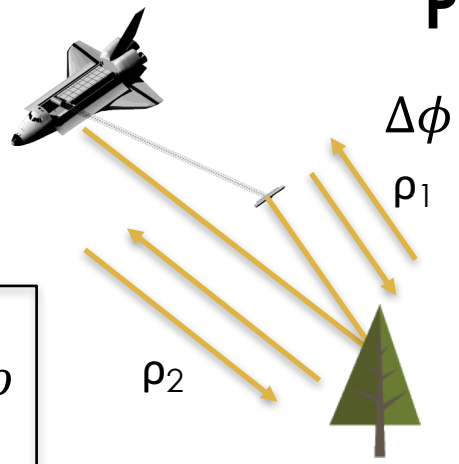
$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_2 + \rho_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_1 + \rho_1)$$

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

$$\boxed{\Delta\phi = \frac{2\pi\rho}{\lambda}\delta\rho \quad p=1}$$

Slide modified from Paul Rosen (JPL)

Ping-Pong



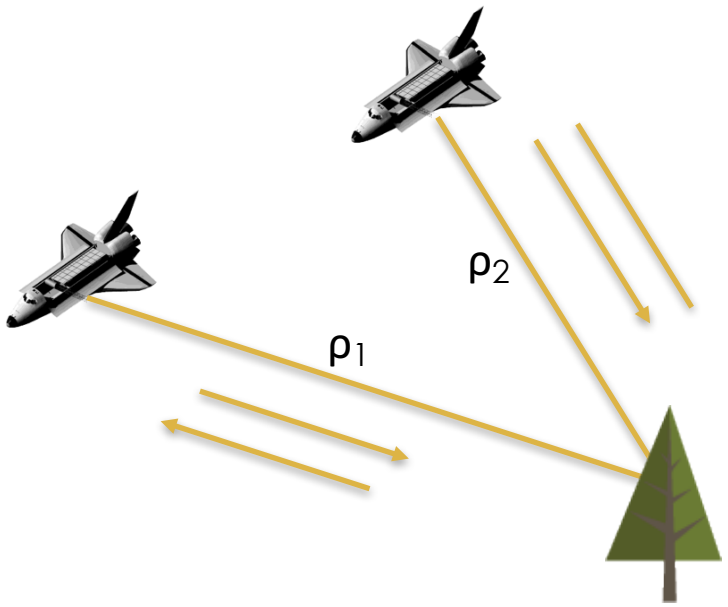
$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_2 + \rho_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_1 + \rho_1)$$

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

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

Opciones para la recolección de datos II

- Los datos interferométricos también pueden ser recopilados en el modo de pases repetidos (repeat pass interferometry o RPI)
- Se producen dos observaciones de radar de la misma escena separadas en el tiempo
  - El intervalo temporal puede ser de segundos hasta años
  - 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



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

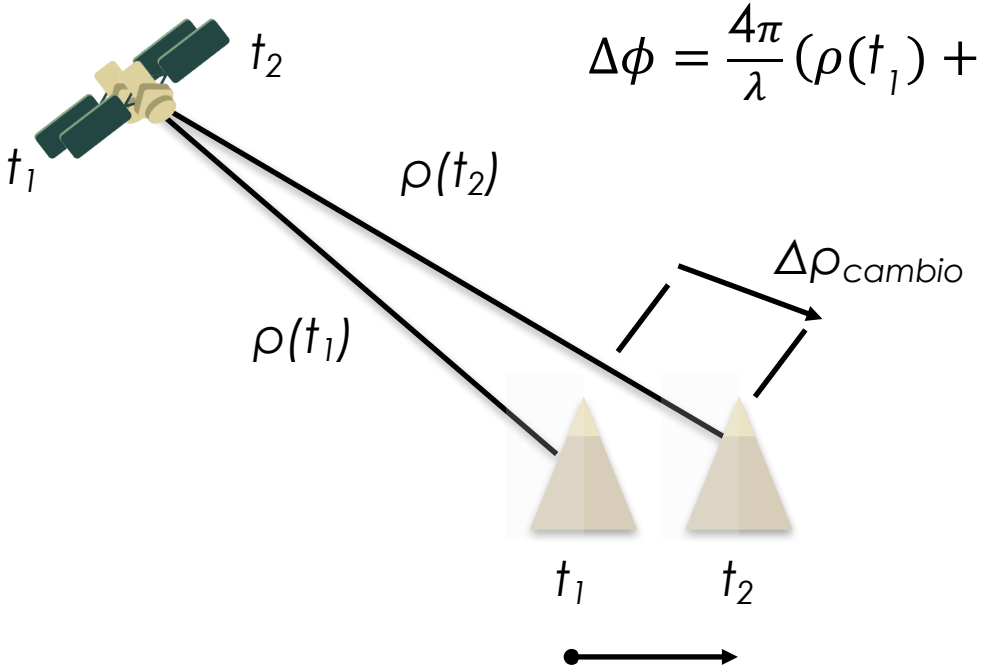
$$= \frac{4\pi}{\lambda}(\rho_2 - \rho_1)$$

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

Slide modified from Paul Rosen (JPL)

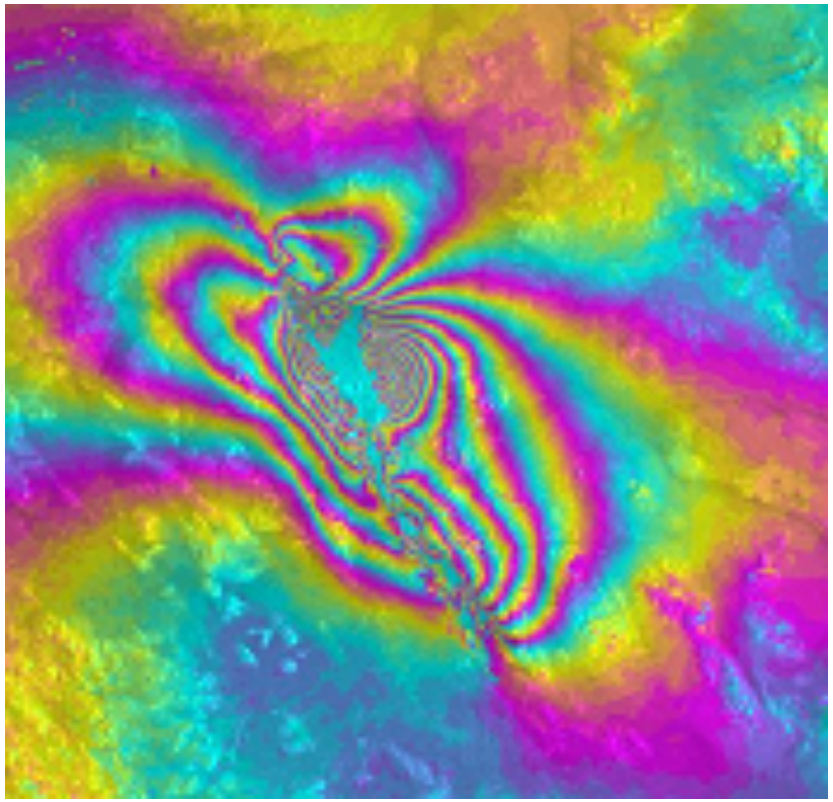
Interferometría Diferencial

- 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 las medidas de un atributo de la superficie



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

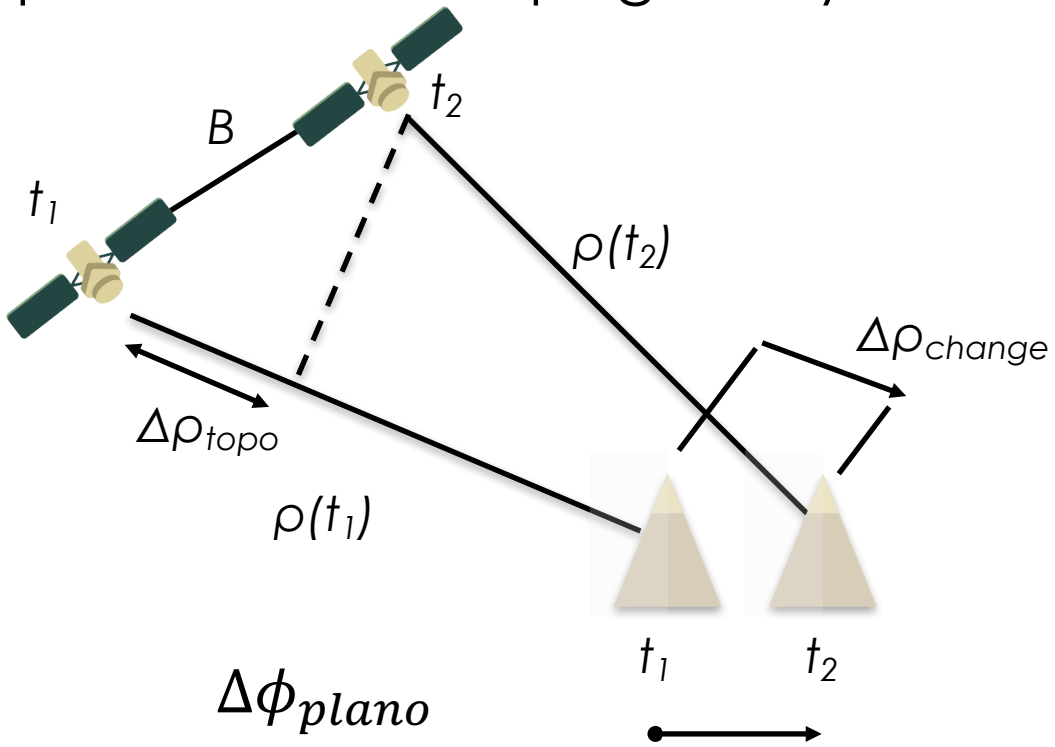
Terremoto de la mina Hector



Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL)

Interferometría Diferencial y Topografía

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



$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\left(-\left\langle \hat{l}, \vec{b}\right\rangle + \left\langle \hat{l}, \vec{D}\right\rangle\right)$$

término topográfico

término de cambio

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\Delta\rho_{cambio} - \Delta\rho_{topo}\right)$$

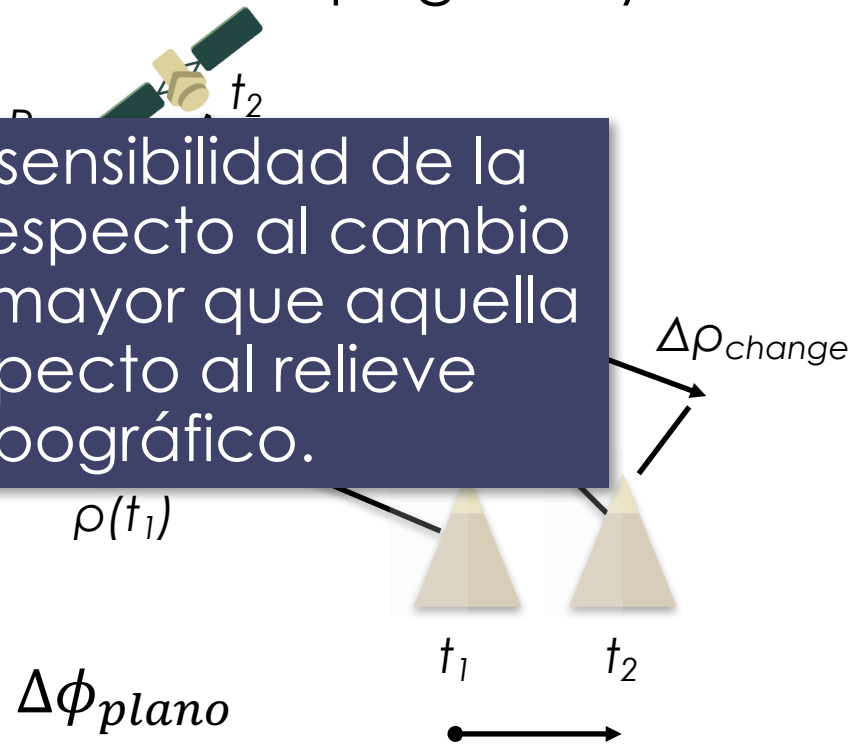
$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\Delta\rho_{cambio} - B\,\mathrm{sen}(\theta - \alpha)\right)$$

$$\Delta\phi_{plano} = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\Delta\rho_{cambio} - \frac{B_{\perp} h_T}{\rho\,\mathrm{sen}\,\theta}\right)$$

Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL)

Interferometría Diferencial y Topografía

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



$$\Delta\phi_{plano}$$

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

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\left(-\left\langle \hat{l}, \vec{b}\right\rangle + \left\langle \hat{l}, \vec{D}\right\rangle\right)$$

término

término de

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

$$\Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \frac{\quad}{\lambda}\left(\Delta\rho_{cambio} - B\,\mathrm{sen}(\theta - \alpha)\right)$$

$$\Delta\phi_{plano} = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\Delta\rho_{cambio} - \frac{B_{\perp} h_T}{\rho\,\mathrm{sen}\,\theta}\right)$$

Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL)

Sensibilidades Interferométricas Diferenciales

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

$$\boxed{(\phi \Leftrightarrow \Delta\phi)}$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial h} = \frac{2\pi B\cos(\theta-\alpha)}{\lambda\rho\,\mathrm{sen}\,\theta} = \frac{2\pi b_\perp}{\lambda\rho\,\mathrm{sen}\,\theta}$$

Sensibilidad Topográfica

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

Sensibilidad al Desplazamiento

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

Término de Sensibilidad Topográfica

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

Término de Sensibilidad al Desplazamiento

Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL

Sensibilidades Interferométricas Diferenciales

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

$$\boxed{(\phi \Leftrightarrow \Delta\phi)}$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial h} = \frac{2\pi B\cos(\theta-\alpha)}{\lambda\rho\,\mathrm{sen}\,\theta} = \frac{2\pi b_\perp}{\lambda\rho\,\mathrm{sen}\,\theta}$$

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

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

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

Como $\frac{b}{\rho} \ll 1 \rightarrow \frac{\sigma_{\phi_{desp}}}{\sigma_{\Delta\rho}} >> \frac{\sigma_{\phi_{topo}}}{\sigma_h}$

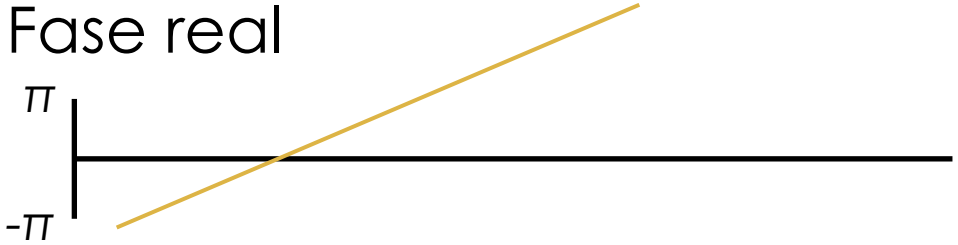
Medición topográfica a escala métrica – Cambio topográfico a escala milimétrica

Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL

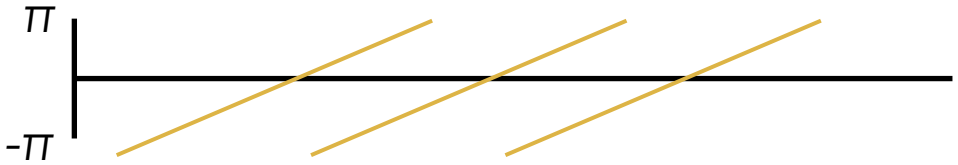
Desenvolvimiento de Fase

De la fase medida y envuelta, desenvuelva la fase de algún punto de comienzo arbitrario, después determine la "ambigüedad" de fase 2p correcta

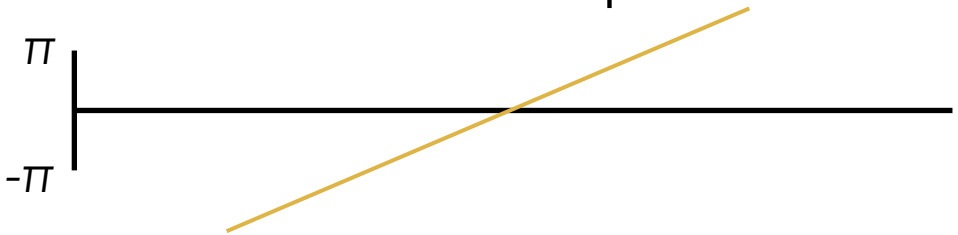
Fase real

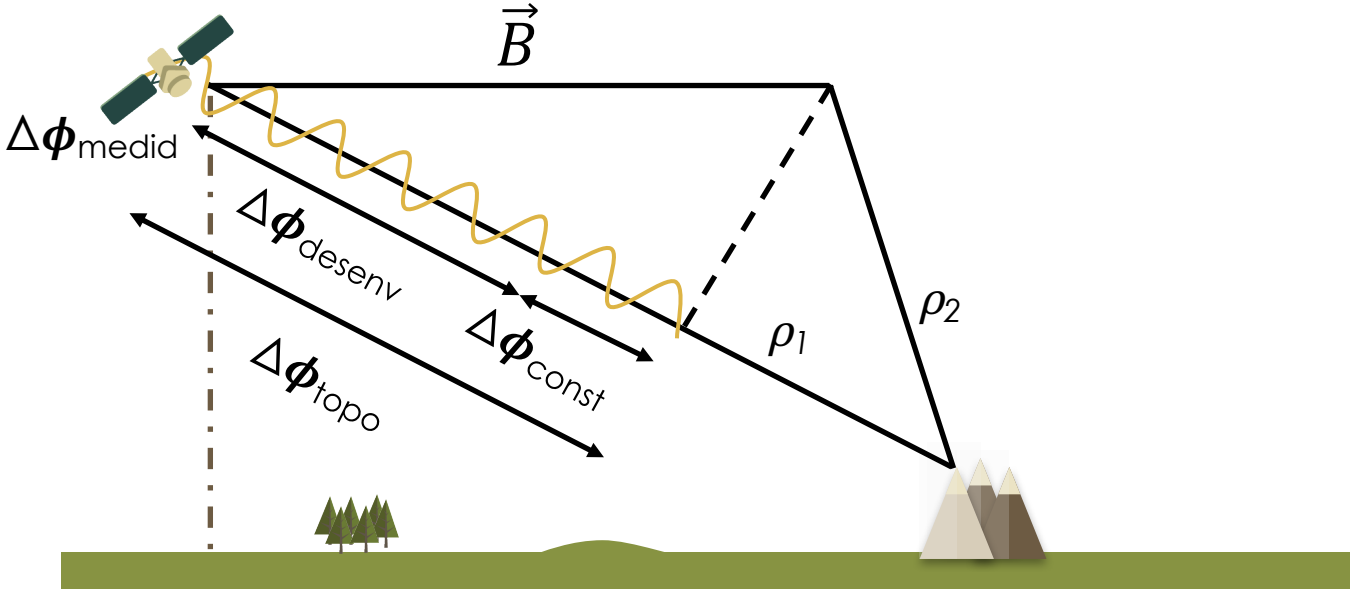


Fase envuelta (medida)



Fase desenvuelta típica





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

$$\Delta\phi_{medid} = mod\left(\Delta\phi_{topo}, 2\pi\right)$$

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

Teoría de Correlación*

- Las señales InSAR se decorrelacionan (se vuelven incoherentes) debido a:
  – ruido térmico y de procesadores
  – 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*

Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL

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

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

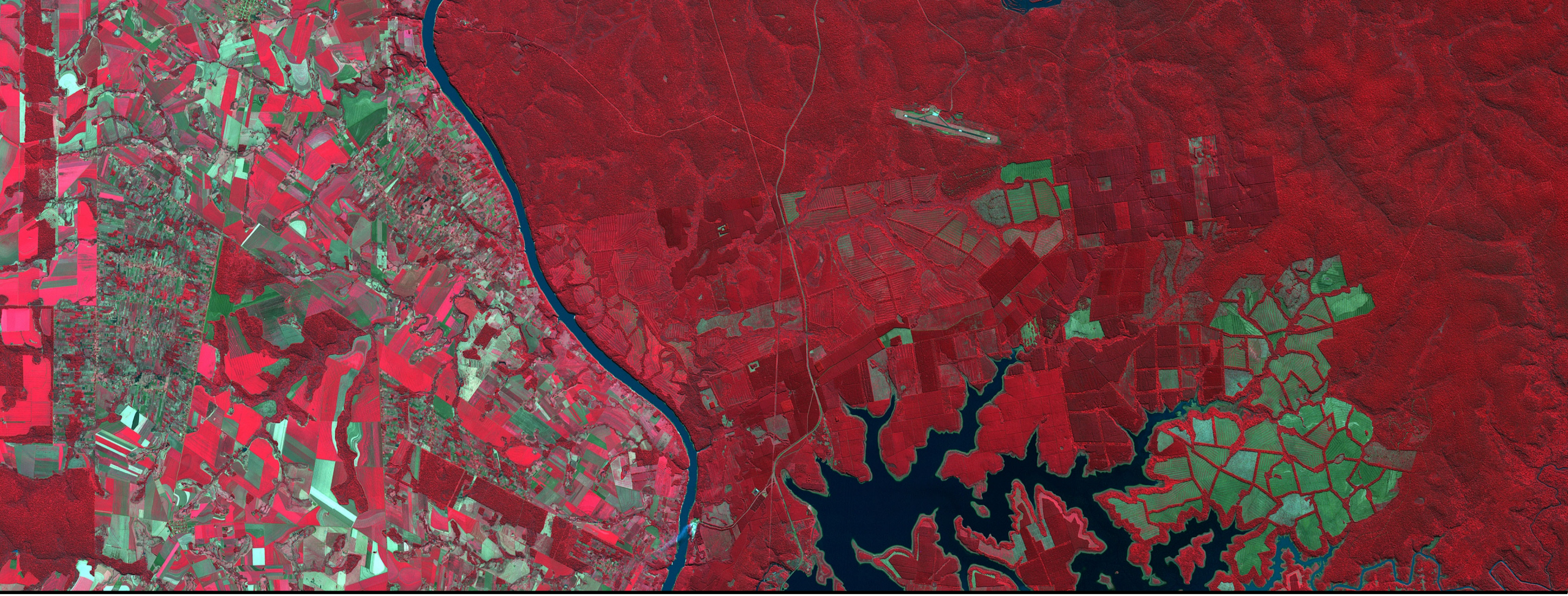
donde

γ_v es volumetrico (árboles)

γ_g es geométrico (pendientes empinadas)

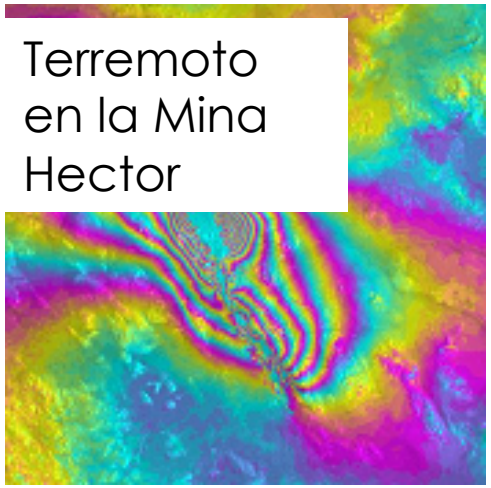
γ_t es temporal (cambios graduales)

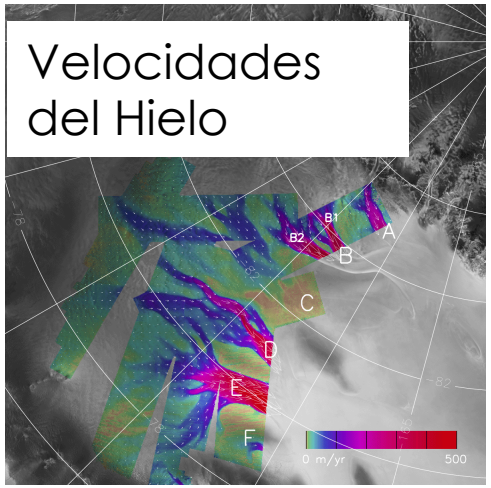
γ_c es cambios repentinos

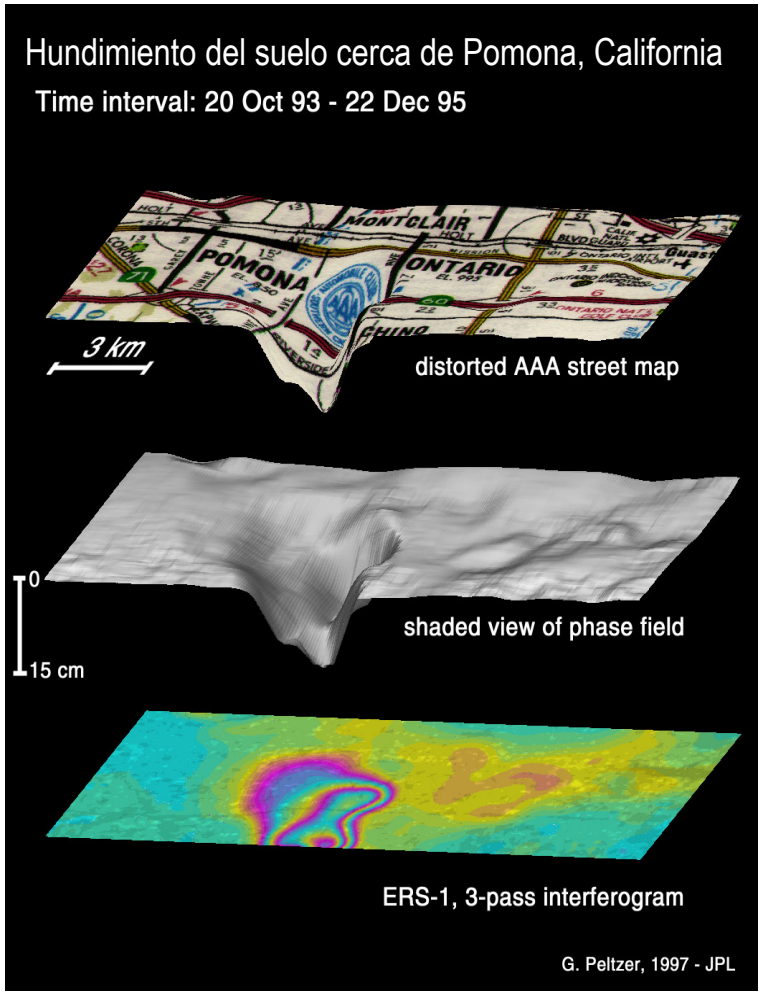


Aplicaciones de InSAR

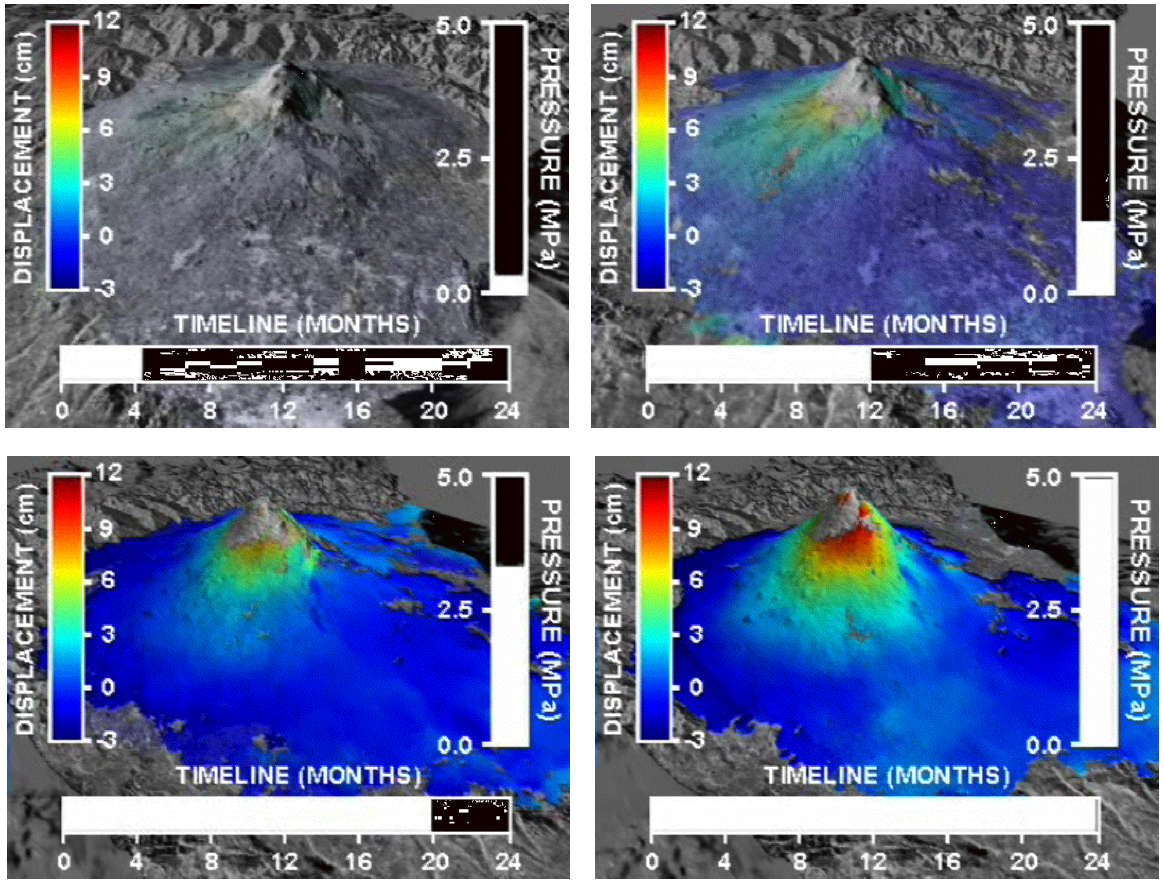
Algunos Ejemplos de Deformación







El Volcán Etna

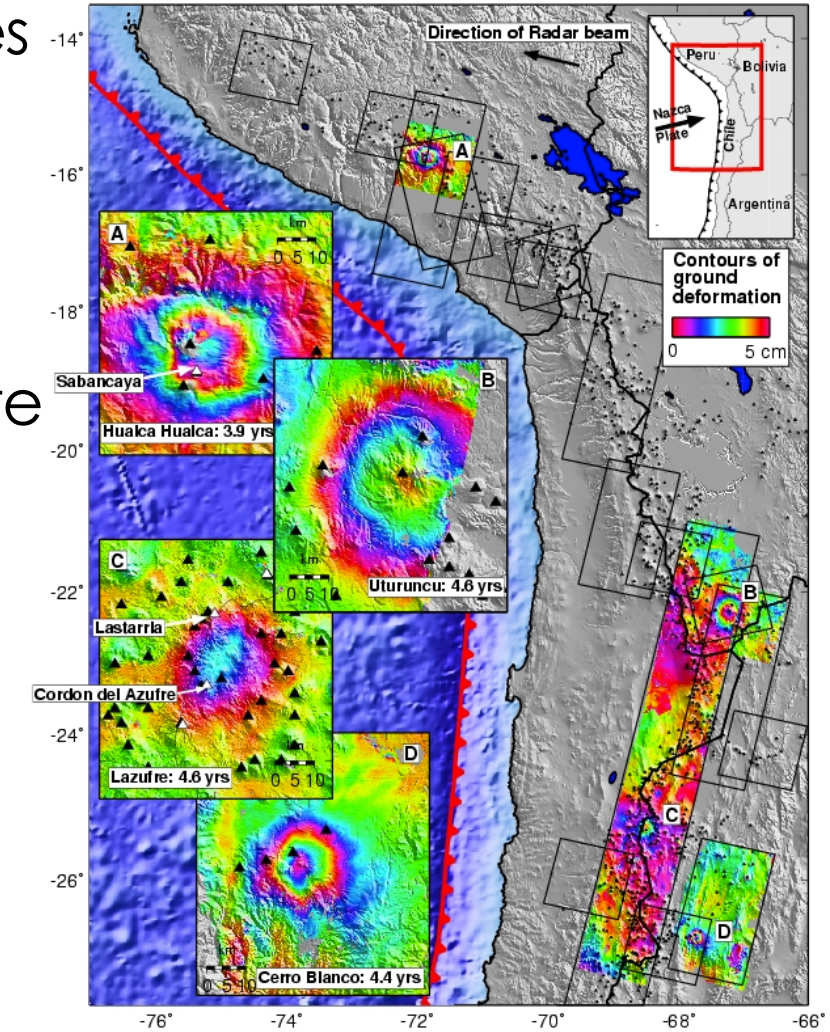


Joughin et al, 1999

Diapositiva modificada de Paul Rosen(JPL)

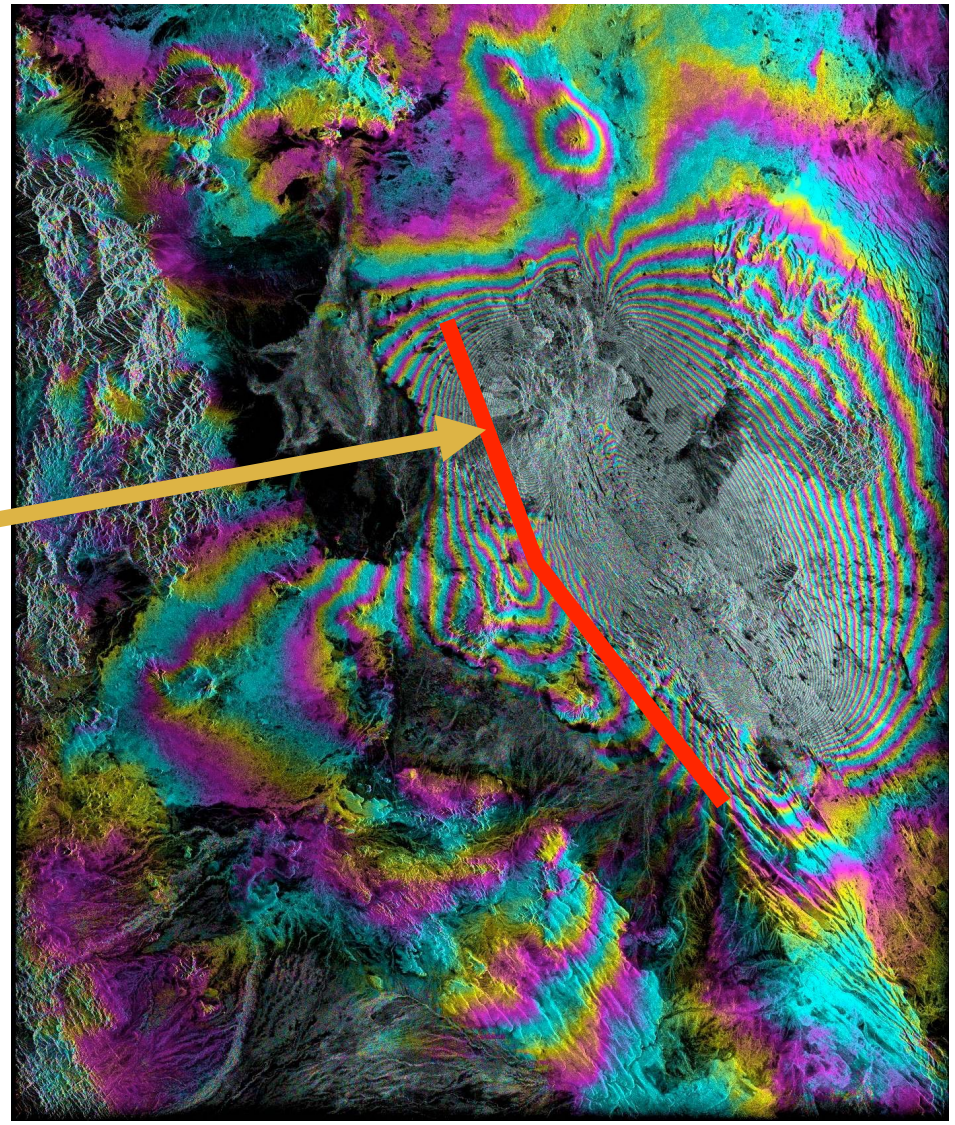
Volcanes del Ande Central

- 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

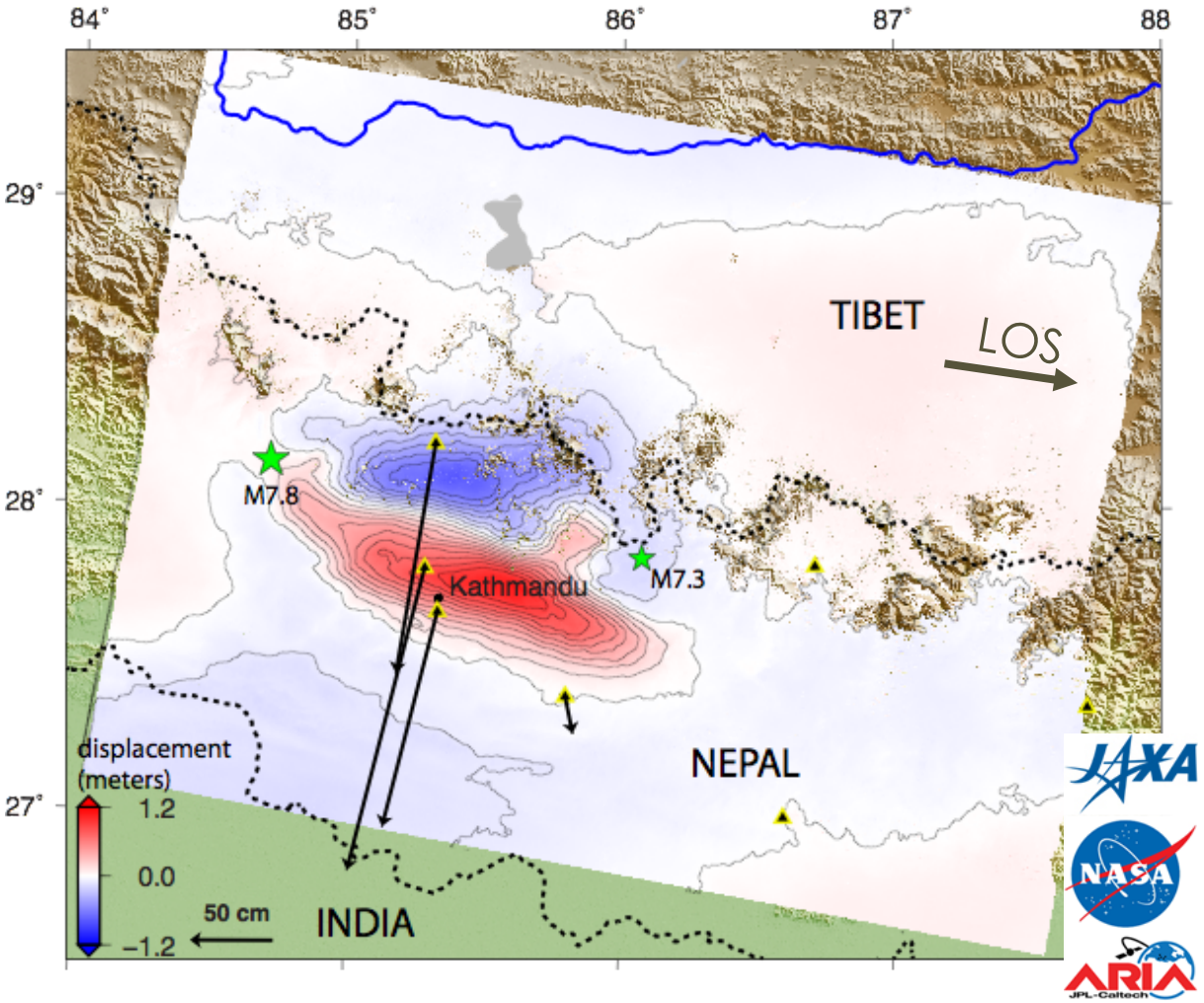
6 de mayo– 28 de oct. 2005



Tim Wright, U. Leads

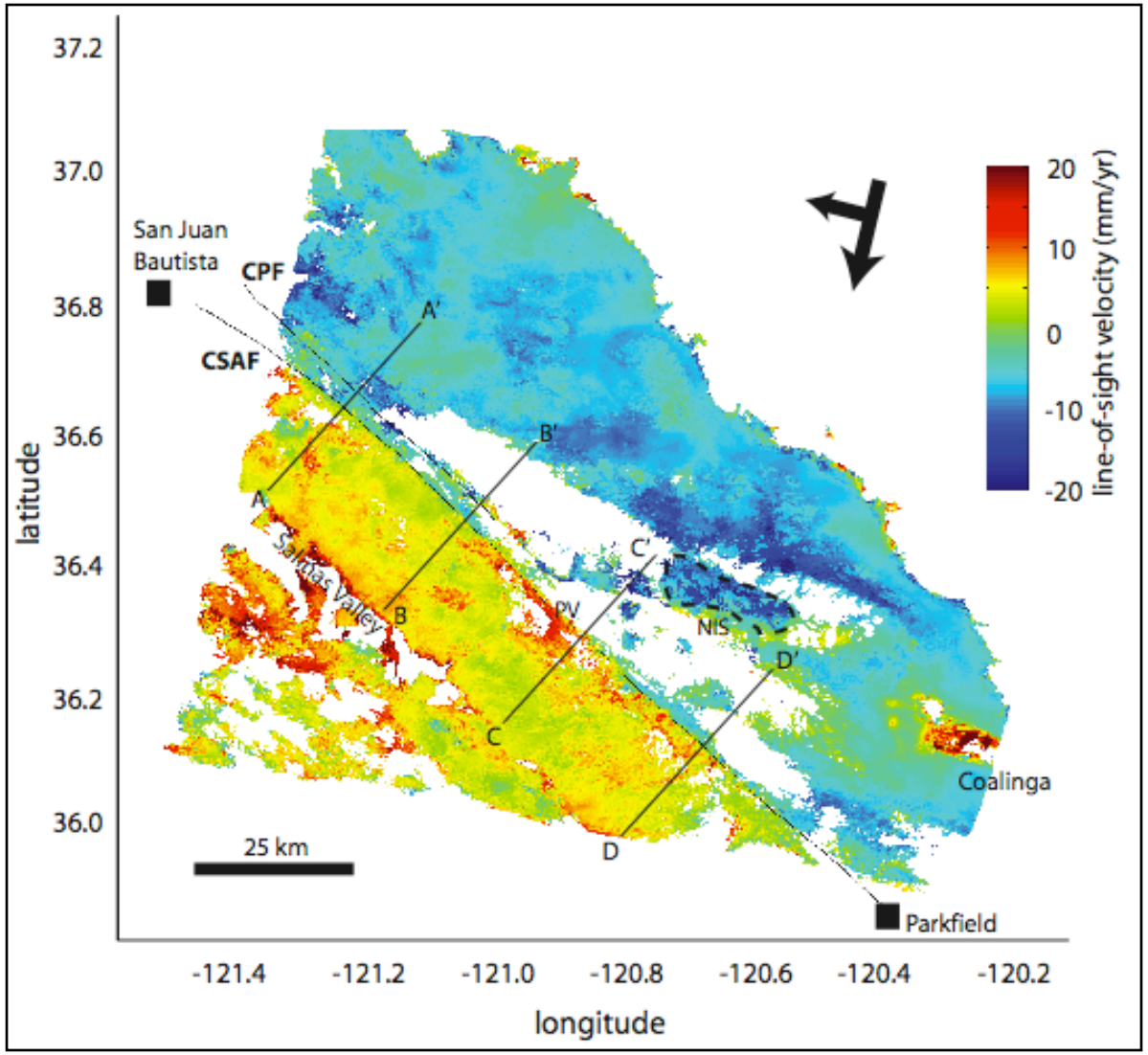
Terremoto M7.8 en Gorkha, Nepal en 2015

- Interferograma ALOS-2 ScanSAR
- Línea visual (line-of-sight o LOS) descendente 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.



Datos de GPS de 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

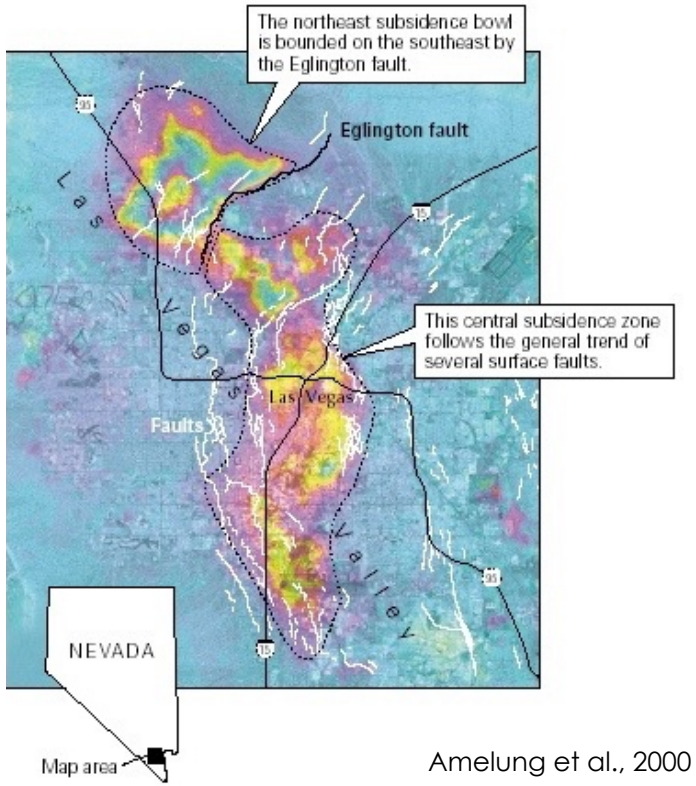


Superposición de 12 interferogramas ERS cubriendo desde mayo de 1992 hasta enero de 2001

Figuras de Isabelle Ryder, U.C. Berkeley

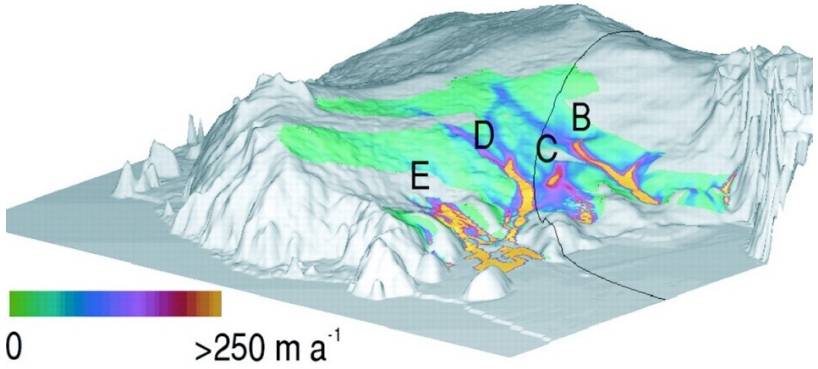
Algunos de los Mayores Éxitos de InSAR

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



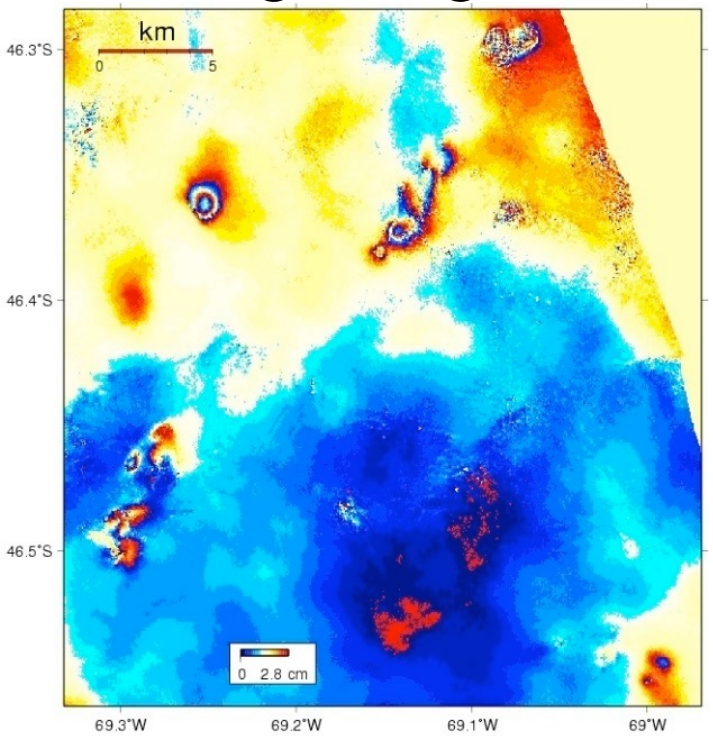
Amelung et al., 2000

Velocidades de flujos de hielo en la Antártida de InSAR/rastreo



Bamber et al., 2000

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

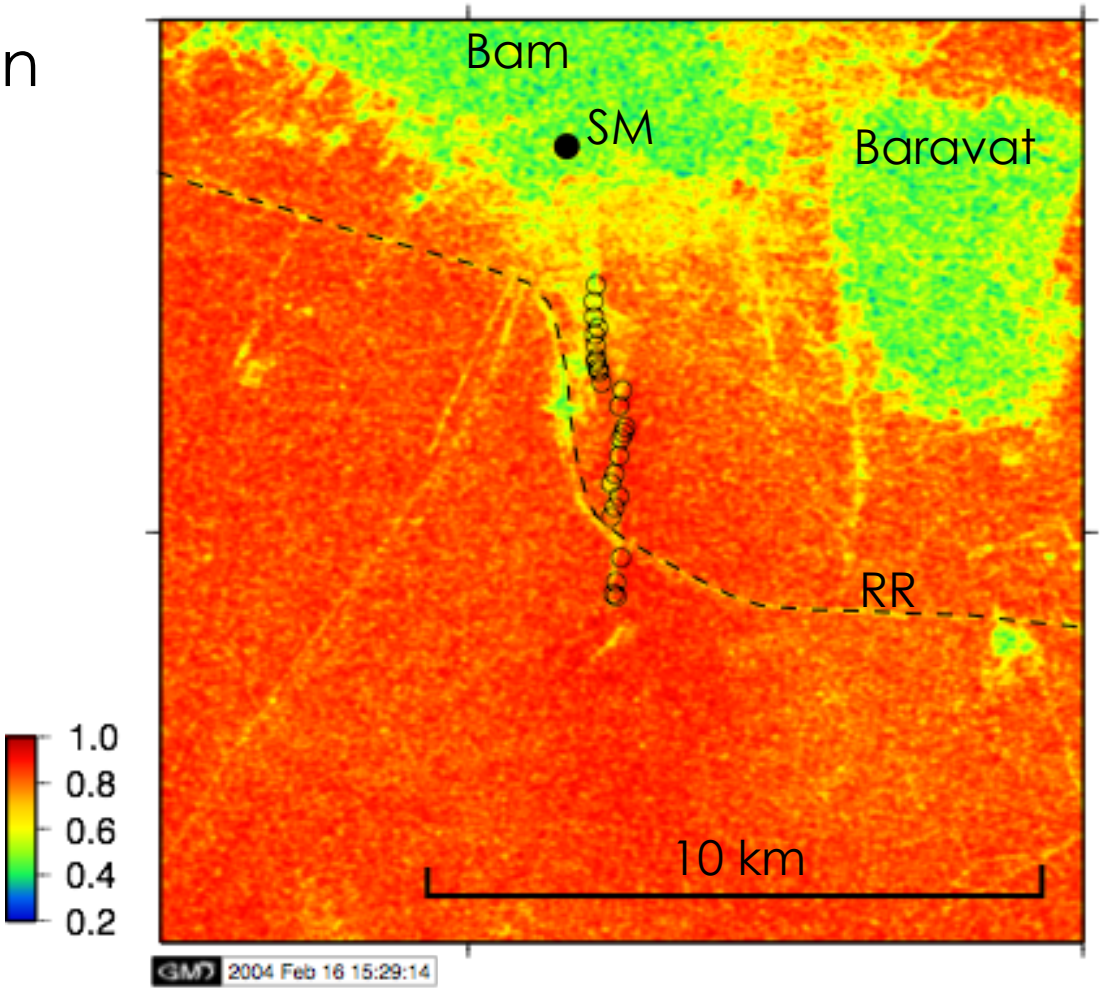


Interferograma Envisat cubriendo 2004-2006

Diapositiva Modificada de Matt Pritchard (Cornell)

La decorrelación muestra rupturas superficiales

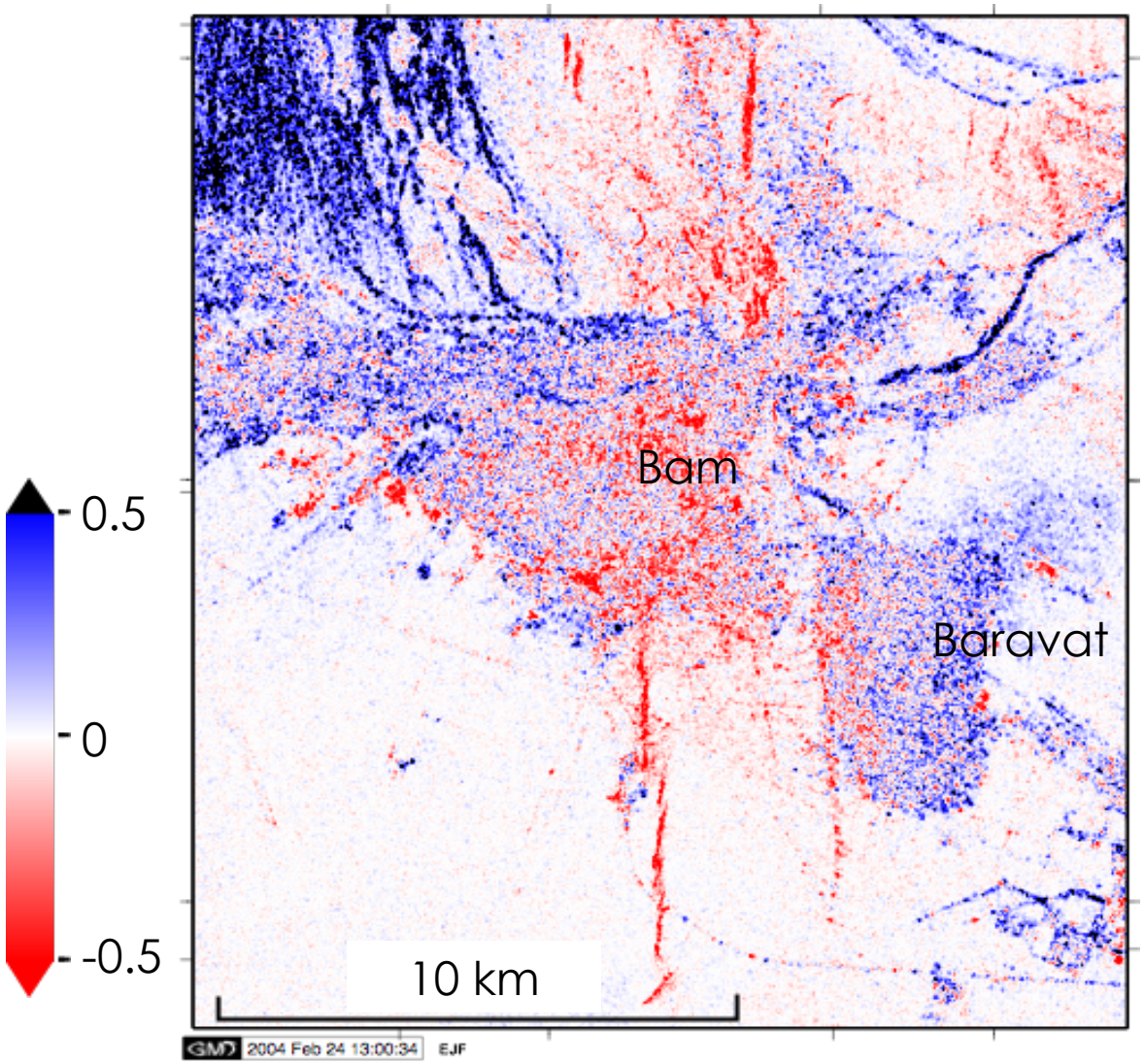
Terremoto M6.5 en Bam, Irán, 2003



- 35 días
- 3 dic. 2003 – 7 ene. 2014
- Envisat
- Trayectoria descendente
- 8perp 580 m

Fielding, E. J., M. Talebian, P. A. Rosen, H. Nazari, J. A. Jackson, M. Ghorashi, and R. Walker (2005), Surface ruptures and building damage of the 2003 Bam, Iran, earthquake mapped by satellite synthetic aperture radar interferometric correlation, *J. Geophys. Res.*, *110*(B3), B03302, doi:10.1029/2004JB003299.

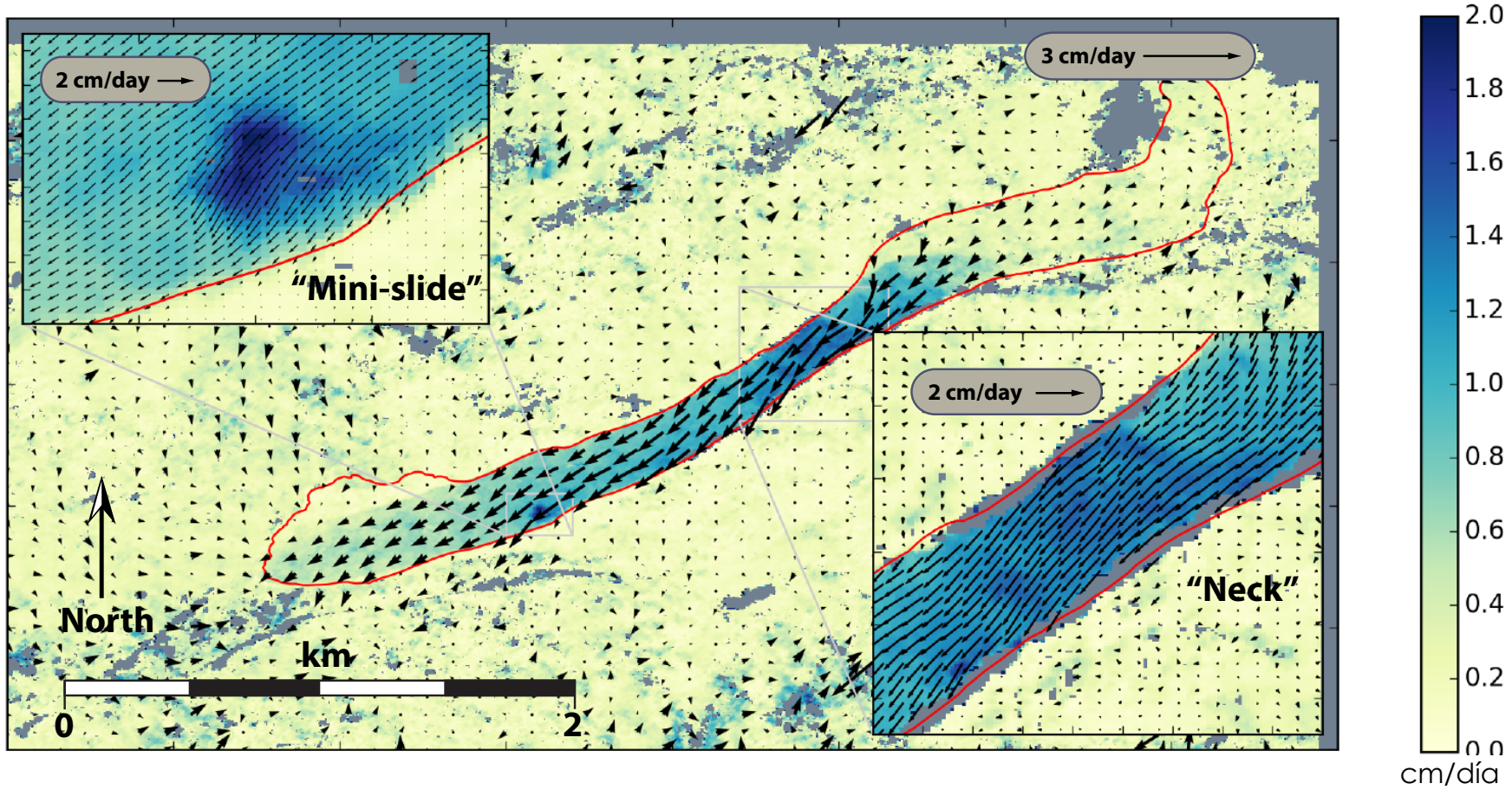
Cambio de correlación



- correlación co-sísmica menos correlación pre-sísmica
- lo rojo 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
- https://nisar.jpl.nasa.gov

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

Slide courtesy of Paul Rosen (JPL)