

ESTUDIO DE ZONAS DE DESLIZAMIENTOS ACTIVOS EN LA CORDILLERA PERUANA, APLICANDO INTERFEROMETRÍA RADAR – INSAR

Katherine Gonzales¹, Bilberto Zavala², Bénédicte Fruneau³, Mirella Díaz¹, Jean-Luc Froger⁴ y Yahayda Loayza¹

1 Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial – CONIDA (Perú); 2 Instituto Geológico Minero Metalúrgico (Perú); 3 Instituto Franciliano de Ciencias UMLV (Francia); 4 Universidad Blaise Pascal II (Francia).
kgonzales@conida.gob.pe

INTRODUCCION

Los deslizamientos de terreno son eventos naturales que suceden con frecuencia en las cuencas hidrográficas del Perú. Los deslizamientos son provocados entre otros por la ocurrencia de fuertes sismos, erosión, pendientes fuertes, deforestación, lluvias intensas, etc. Las condiciones topográficas, la geología y el clima contribuyen a su ocurrencia. Algunos deslizamientos en la cordillera andina comprometen no solo la seguridad física de la infraestructura (carreteras, puentes, pueblos, etc.) sino también la actividad económica (tierras para agricultura, etc.). Estudios llevados a cabo en el marco de programas de investigación en el mundo, han permitido estimar y evidenciar la contribución de la teledetección usando tecnología SAR para la evaluación de peligros naturales, entre ellos los deslizamientos (Squarzoni, C. et al., 2003). El presente trabajo muestra los resultados preliminares de la aplicación de la técnica Interferometría Radar (INSAR) para la detección de la deformación del suelo, así como su seguimiento a lo largo del tiempo, en áreas de deslizamientos en la cordillera andina.

AREAS DE INTERES

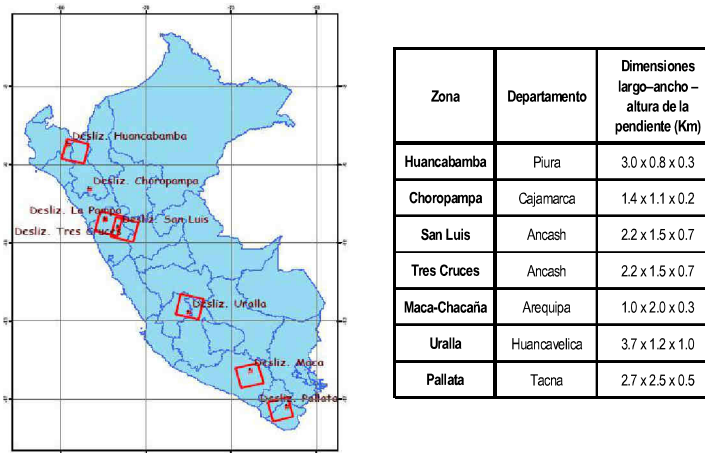


Figura 1. Mapa de ubicación de las 6 zonas de deslizamientos elegidas.

Seis zonas de deslizamientos han sido elegidas para llevar a cabo el presente estudio: Huancabamba en Piura, Pallata en Tacna, Uralla en Huancavelica, Maca en Arequipa, San Luis y Tres Cruces en Ancash, ver **figura N°1**. Estas han sido seleccionadas del mapa de peligros geológicos de INGEMMET, considerando principalmente la vulnerabilidad de aquellas áreas donde se encuentra infraestructura implicada (poblaciones, carreteras, puentes, etc.). Desde el punto de vista técnico, estas fueron elegidas también considerando sus dimensiones e importancia, ver **tabla 1**.

Observaciones de campo previas, hechas por INGEMMET entre los años 1989 y 2004, de estos deslizamientos permitieron caracterizar el tipo de movimiento y los procesos geodinámicos de los mismos, así como obtener una cartografía previa de las principales características (medidas del deslizamiento, límites y extensión de escarpas, etc).

Posteriormente se llevaron a cabo trabajos de campo conjuntos entre CONIDA e INGEMMET para tomar puntos de control (localización de puntos estables, límites de escarpas, etc.) para contrastar con la información de los interferogramas en los siguientes deslizamientos:

- *Deslizamiento de Huancabamba (Piura):* Los movimientos se iniciaron en 1928 a causa de un gran sismo, actualmente se registran continuos movimientos en la zona urbana. El proceso geodinámico es tipificado como una reptación de suelos, debido a que su movimiento es extremadamente lento (*Perales, 1972*), ver *foto 1*.



Foto N° 1. Deslizamiento de Huancabamba



Foto 2. Deslizamiento de Tres Cruces.

- *Deslizamiento de Tres Cruces – La Pampa (Ancash):* El movimiento es tipificado como movimiento rotacional (*Dávila S., et al., 1989*). Muestra agrietamientos y asentamientos en las laderas, afectando un tramo importante de la carretera Huaraz-Sihuas y Santa-Sihuas, ver *foto 2*.
- *Deslizamiento de San Luis (Ancash):* El deslizamiento es producto de la saturación y sobrecarga del suelo y roca, de las aguas de precipitación pluvial e infiltraciones, del uso inadecuado de sistemas de conducción de agua, malos drenajes de aguas provenientes de la mina La Perla, actualmente paralizada. El tipo del movimiento es rotacional, lento a muy lento (*Fidel L. & Valenzuela O., 1996*).
- *Deslizamiento de Pallata (Tacna):* Las causas naturales son las discontinuidades y la calidad de la roca, la naturaleza del suelo, la elevada pendiente del terreno, sumado a la infiltración de las aguas de precipitación pluvial (*Fidel L. & Villacorta S., 2004*). Movimiento es tipificado como traslacional rotacional, ver *foto 3*.



Foto 3. Foto de la escarpa mayor del deslizamiento de Pallata.

DATOS UTILIZADOS

Noventa imágenes radar SAR de los satélites ERS-1, ERS-2 y ENVISAT han sido adquiridas de la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del proyecto CAT-1 ID:3839 para el estudio de las seis zonas de deslizamientos, siendo aproximadamente 81 las imágenes que han sido recibidas a la fecha. Se trabajó con imágenes ASA_IMS_1P (SLC - Single Look Complex) adquiridas en polarización vertical VV. Las imágenes SLC son imágenes complejas que conservan la información de amplitud y fase. La técnica INSAR explota la información de fase, la cual depende de la distancia entre el suelo y el satélite.

La selección de las imágenes fue realizada considerando su disponibilidad (existencia en archivo), paso del satélite (ascendente o descendente) y ángulo de vista del satélite con relación a la dirección de las pendientes y movimiento del deslizamiento (si la dirección del movimiento del deslizamiento es paralelo a la dirección del satélite, éste no será detectado), y también en función al régimen

pluviométrico (periodo sin nubes) de las zonas elegidas, con el fin de asegurar las mejores condiciones en la obtención de resultados.

CALCULO INTERFEROMETRICO

La técnica INSAR consiste en calcular la diferencia de los valores de fase entre dos imágenes radar adquiridas sobre una misma área pero en diferentes fechas. De esta manera se obtiene una nueva imagen, llamada «interferograma», en la cual las franjas de colores expresan el cambio en el tiempo de viaje de las ondas radar entre estas dos adquisiciones. Cualquier cambio en la posición del suelo, modificará entonces la distancia entre el satélite y el suelo, lo que resultará en patrones de franjas de colores que serán observadas en el interferograma. Una franja ($0-2\pi$) equivale a 0.5λ de margen de cambio, donde λ es la longitud de la onda radar, (para el caso de los satélites ERS y ENVISAT que operan en la banda C, el margen de cambio será 2.8 cm.). Para el cálculo interferométrico hemos utilizado el software DIAPASON (de Altamira-Information).

La **tabla N° 2**, muestra los interferogramas calculados a partir de las 75 imágenes. Estas imágenes permiten, en teoría, 234 combinaciones o interferogramas (para las seis zonas), sin embargo sólo han sido seleccionados 78 interferogramas, que presentan Líneas de Base cortas (Altitudes de ambigüedad AA superiores a 30). Los interferogramas con valores de AA menores a 30 no presentan buena coherencia.

Para remover la componente topográfica de los interferogramas, hemos usado un Modelo Digital de Elevación de tamaño de píxel de 45 metros (obtenido de la interpolación del DEM SRTM-90 de la NASA).

Algunos interferogramas mostraron una componente atmosférica. Para este caso hemos utilizado el método propuesto por *Beauducel et al. (1998)* que se basa en la correlación que existe entre los valores de fase y la topografía, esto asumiendo una atmósfera estratificada.

Imágenes Envisat	Track	Pase	Imágenes	Combinación posibles	Pares Calculados AA > 30	Pares Calculados AA < 30
TresCruces	2443	Descendente	6	15	4	11
TresCruces	4397	Descendente	2	1	1	0
San Luis	4261	Ascendente	4	6	2	4
Huancabamba	2254	Descendente	6	15	4	11
Pailata	4261	Ascendente	10	45	28	17
Pailata	2046	Ascendente	4	6	1	3
Uralla	4447	Ascendente	4	6	0	6
Total			36	94	40	54
Imágenes ERS	Track	Pase	Imágenes	Combinación posibles	Pares Calculados AA > 30	Pares Calculados AA < 30
TresCruces	2443	Descendente	13	78	23	55
San Luis	2218	Ascendente	7	21	5	16
San Luis	2447	Ascendente	2	1	0	1
Huancabamba	2254	Descendente	5	10	3	7
Pailata	246	Ascendente	6	15	3	12
Uralla	2404	Ascendente	6	15	4	11
Total			39	140	38	102

Tabla 2. Número de imágenes disponibles, número de combinaciones posibles ASAR y ERS.

Desenrollado de interferogramas

Esta fase consiste en eliminar la ambigüedad de fase, es decir pasar de valores de fase de 0 a 2π , hasta valores de fase absolutos que vayan de $-n\pi$ a $+n\pi$. Esta fase es necesaria para poder convertir los valores de fase absolutos en valores en centímetros (en los interferogramas obtenidos con imágenes ASAR y ERS una variación de 0 a 2π equivale a una variación de 2.8 cm.). Los interferogramas han sido desenrollados usando el software Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping, SNAPHU (*Chen C. & Zebker A, 2003*).

RESULTADOS

Debido a la reducida disponibilidad de escenas de archivo para algunos deslizamientos como Uralla y Huancabamba y, en consecuencia, al largo periodo de tiempo cubierto por las imágenes de archivo con las nuevas programaciones hechas para el presente estudio, no se ha podido obtener una serie temporal

para estos deslizamientos. En el caso del deslizamiento de San Luis, si bien se contó con una buena cantidad de imágenes, la vegetación ha sido un factor que ha limitado la obtención de interferogramas coherentes.

Para el caso de los deslizamientos de Tres Cruces, a pesar de no presentar mucha vegetación, los interferogramas obtenidos no han sido muy coherentes, probablemente porque las imágenes de archivo cubren un periodo muy prolongado de tiempo. El deslizamiento de Pallata es el que mejores resultados ha dado por las condiciones geográficas del mismo.

A continuación se presenta los resultados obtenidos para los deslizamientos de Pallata, Tres Cruces y Huancabamba.

Zona de deslizamiento de *Pallata*

Las condiciones de esta zona (poca vegetación) han favorecido la obtención de interferogramas coherentes (ver *figura 2*).

En la *figura 2B* se muestra una composición RGB (731) de una imagen ASTER correspondiente a la zona, a la cual se ha superpuesto las escarpas de las zonas de deslizamiento cartografiadas en campo. Notamos que la mayor parte de las escarpas correspondientes a los deslizamientos corresponden a zonas cubiertas por vegetación. En la *figura 2A* se muestra una extracción del interferograma 14443_21958 (obtenido con imágenes adquiridas en las fechas 04/12/2004 y 13/05/2006 respectivamente), donde se observan franjas interferométricas correspondientes a la deformación del suelo producto del deslizamiento. La parte activa del movimiento, puesto en evidencia por la Interferometría Radar, se limita a dos áreas muy localizadas, una ubicada hacia el SO del poblado de Pallata y la otra más pequeña ubicada al norte de Pallata.

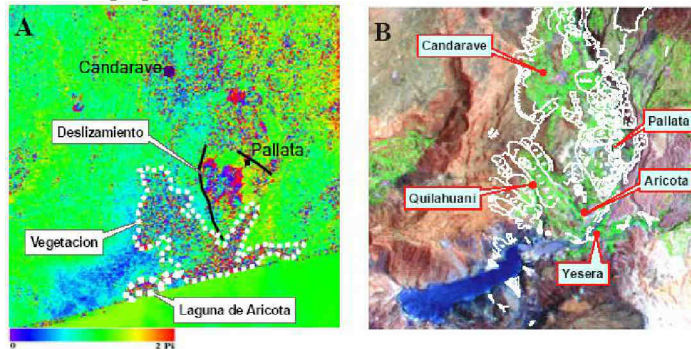


Figura 2. **A)** Corte del interferograma 14443-21958 calculado con imágenes adquiridas en paso ascendente y fechas: 04/12/2004 y 13/05/2006 (Altitud de Ambigüedad: -307.9; Baseline corta). **B)** Muestra una extracción correspondiente de la imagen Aster (RGB:731) en la misma zona y a la cual se ha superpuesto las escarpas y límites de los deslizamientos cartografiados en campo. LOS = Line of Sight.

Aún cuando la zona de deformación esta cubierta por poca vegetación, los interferogramas se presentan coherentes y dado que se cuenta con una buena cantidad de imágenes ASAR es posible obtener una serie temporal de deformación que permita obtener una estimación de la velocidad a la cual se deforma dicho deslizamiento.

El interferograma 19639_24148 (de fechas 02/12/2005_13/10/2006), que se muestra en la *figura 3* (izquierda), ha sido desenrollado (derecha) para eliminar la ambigüedad de fase, posteriormente se determinó el valor cero en base a la puntos GPS ubicados en campo correspondientes a zonas estables que asumimos como el valor “cero” de deformación. Luego a partir del interferograma desenrollado se extrajo las curvas de deformación mostradas en la parte central. Los valores de deformación son valores relativos ya que estos representan los cambios en la posición del suelo pero en dirección del satélite.

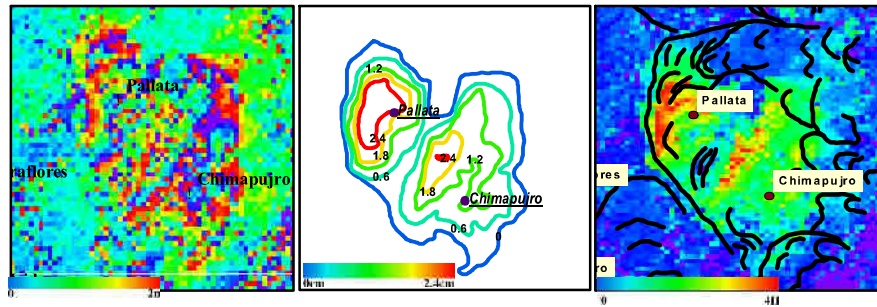


Figura 3. Extracción del Interferograma 19639_24148 (02/12/2005_13/10/2006), correspondiente a la zona del deslizamiento activo cercano al pueblo de Pallata (izquierda); Interferograma desenrollado (derecha); Curvas de deformación obtenidos a partir del interferograma desenrollado (centro).

El movimiento del deslizamiento es hacia el SE, a partir de los contornos de deformación de la *figura 3*, podemos observar que existe aparentemente una zona intermedia que separa la zona de deformación en dos partes, una zona superior y una zona inferior. La mayor parte de los interferogramas presentan este patrón.

Zona de deslizamiento de *Tres Cruces*

La *figura 4*, muestra una extracción del interferograma 44516_24843 Tandem (calculado con imágenes de fechas: 19/01/00 y 20/01/00). En este se observa variaciones de fase (franja) en dos pequeñas zonas (Trigopampa y Tres Cruces) que podrían estar relacionadas al deslizamiento ya que, según las escarpas cartografiadas en campo, estas franjas ocurren dentro de una zona cartografiada. Los datos obtenidos en este deslizamiento no son suficientes para poder interpretar la deformación observada, sin embargo el hecho de que se registren variaciones de fase (variación de alrededor 1/2 de franja ~ 1.4 cm.) en el interferograma Tandem (con un día de diferencia) indicaría un movimiento rápido del terreno en esa zona. **¡Error!**

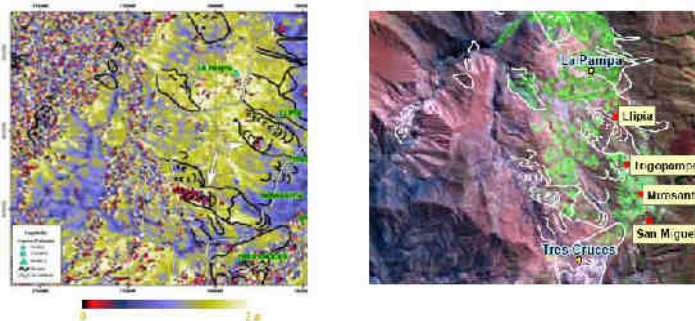


Figura 4. Interferograma 44516_24843 Tandem (calculado con imágenes de fechas: 19/01/00 y 20/01/00), se registra franjas de deformación en un área muy localizada asociada al deslizamiento.

Zona del deslizamiento de *Huancabamba*

Los interferogramas obtenidos para este deslizamiento son limitados (3), ya que no existieron muchas imágenes de archivo y los interferogramas obtenidos han sido calculados mayormente con imágenes programadas en cuyo caso la AA no ha sido muy buena. En la zona urbana se observa una mejor coherencia (ver *figura 5*), sin embargo la resolución espacial del Modelo de Elevación utilizado en este caso es muy bajo, por ello será necesario trabajar con un DEM de tamaño de píxel de 20 a 30 metros.

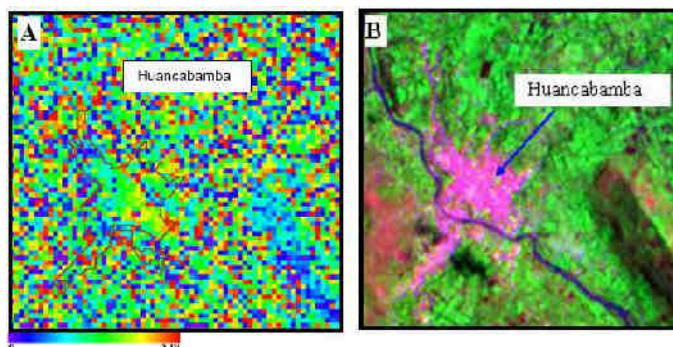


Figura 5. Extracción del Interferograma 20512_21514 (separación dos meses), calculado con DEM SRTM-90 remuestreado a 45 metros. La resolución del DEM no es suficientemente buena para detectar los posibles cambios en la posición del suelo.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La aplicación de la técnica INSAR para el estudio de la potencialidad de la misma en el monitoreo de 5 zonas de deslizamientos de la Cordillera Andina, ha permitido determinar que los deslizamientos de la parte centro y sur del Perú como Tres Cruces (Ancash) y Pallata (Tacna) tienen mayores posibilidades de ser estudiadas por esta técnica, siendo Pallata el que mejores resultados ha dado.

Para los deslizamientos de la parte norte del Perú como San Luis y Huancabamba, dos factores no han permitido obtener buenos resultados, como la cobertura vegetal y la baja resolución del Modelo Digital de Elevación. Estas dos zonas presentan un gran interés ya que son pueblos enteros (zonas urbanas) que están continuamente deslizándose, por ello una de las perspectivas de nuestro trabajo es aplicar la técnica Permanent Scatterers o PS-INSAR.

BIBLIOGRAFÍA

- Beauducel, F., P. Briole, J.-L. Froger, 2000. Volcano-wide fringes in ERS synthetic aperture radar interferograms of Etna (1992 - 1998): Deformation or tropospheric effect?, *J. Geophys. Res.*, 105 (B7), 16391-16402, 10.1029/2000JB900095.
- Fidel S., L. & Valenzuela O., G. 1996. Inspección Geológico-Geodinámica del deslizamiento de San Luis. Informe Técnico Interno. INGEMMET, Dirección de Geotecnia.
- Fidel S., L. & Villacorta, S. 2004. Amenazas Geológicas en el área de Candarave. Informe inédito. INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental.
- Perales C., F. 1972. Reptación de suelos en el Área de Huancabamba. Informe Técnico, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Squarzoni, C., Delacourt, C., Allemand, P. 2003. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Vallette landslide observed by SAR interferometry, *Engineering Geology* 68, 53-66.
- C. W. Chen and H. A. Zebker. 2003. Statistical-cost, Network-flow for Phase Unwrapping – SNAPHU. Leland Stanford Jr. University.
- Dávila S., Fidel L., Aniya R., Guzmán A., González M., Hernández E. & Valdivia J. 1989. Estudio Geodinámico de la Cuenca del Río Santa. INGEMMET, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, p. 403.