



JOSEP  
**Raventós**

Responsable de negocio de España, Portugal y Turquía de TRE ALTAMIRA



GIACOMO  
**Falorni**

Director de operaciones de TRE ALTAMIRA- Canadá



JAVIER  
**González-Martí**

Project Manager C704-C750's-X9171-C821 de Crossrail project

# Las aportaciones de la tecnología satelital en el control del movimiento del terreno en obras subterráneas

## RESUMEN

Este artículo se centra en la Interferometría Diferencial SAR (DInSAR), una técnica de teledetección utilizada para detectar deformación del terreno. El objetivo de este artículo es exponer las características principales de la metodología utilizada en TRE ALTAMIRA para la detección de movimientos del terreno con precisión milimétrica y presentar algunos ejemplos de aplicación dentro del campo de los túneles y excavaciones subterráneas.

La detección de desplazamientos del terreno mediante técnicas DInSAR está ganando relevancia dentro del mundo de la construcción. En primer lugar, estas técnicas ofrecen una serie de ventajas operacionales como la cobertura de grandes áreas a bajo coste, la adquisición regular de medidas a lo largo del tiempo, y la disponibilidad de grandes archivos históricos de datos. En segundo lugar, proporcionan medidas comparables con los métodos geodésicos clásicos.

## PALABRAS CLAVE

Interferometría, radar de apertura sintética, teledetección, precisión, archivo histórico

## ABSTRACT

*This article is focused on the use of Differential Interferometry SAR (DInSAR), a remote sensing technique used to detect ground displacement. The objective of the article is to highlight the main features of the methodology used at TRE ALTAMIRA for the detection of ground displacement with millimetric accuracy and to present examples of application for tunnelling and underground excavations.*

*The use of InSAR for ground displacement monitoring is becoming a standard in the civil engineering sector. The use of these techniques has several operational advantages like an areal coverage at low cost, a regular acquisition over time, and the possibility of analysing the past by using archived data. The data obtained is also comparable with classic geodetic methods.*

## KEYWORDS

*Interferometry, Synthetic Aperture Radar, remote sensing, accuracy, archived data*

# 1

## Fundamentos del DInSAR

DInSAR es una técnica de teledetección para la medición de la deformación de la superficie del terreno que explota la información geométrica contenida en la fase de al menos dos imágenes complejas interferométricas SAR adquiridas sobre la misma área. Este artículo se centra únicamente en el uso de imágenes SAR satelitales. La información principal del DInSAR es la llamada fase interferométrica, obtenida mediante la diferencia de fase de dos imágenes SAR, y relacionada con la topografía de la escena observada y la deformación del terreno que se produjo entre la adquisición de las dos imágenes.

Si se dispone de un modelo numérico del terreno (MNT) de la escena, la componente topográfica de la fase puede ser simulada y restada de la fase interferométrica, obteniendo la parte de la fase DInSAR que está principalmente relacionada con la deformación del terreno. Si se analiza en detalle esta fase DInSAR puede observarse que existen otras componentes a tener en cuenta:

- El ruido de fase. Los sensores SAR realizan un muestreo regular 2D del terreno. Únicamente los píxeles que se caracterizan por un bajo nivel de ruido de fase interferométrica se pueden utilizar para la medición de la deformación. Con el fin de descartar los píxeles ruidosos, se pueden utilizar tanto la coherencia interferométrica como el criterio de amplitud de dispersión (Ferretti et al., 2001).
- La contribución atmosférica. De modo similar a la fase de GPS, la fase DInSAR contiene una componente debida a la propagación de la señal radar a través de la atmósfera durante la adquisición de las imágenes. Los métodos de DInSAR Avanzados (A-DInSAR) tratan de estimar esta componente para cada imagen SAR, ver Ferretti et al. (2001) y Lanari et al. (2004).
- El error topográfico. La componente de fase relacionada con el error topográfico representa una fuente de error para el control de deformaciones. Su magnitud depende de la calidad del MNT usado y de la línea de base normal del interferograma (componente del vector que conecta las dos posiciones del satélite durante las adquisiciones de las imágenes, medida en la dirección perpendicular a la línea de visión del sensor). El uso de múltiples interferogramas ayuda en la estimación del error topográfico.

La mayoría de técnicas DInSAR basan su estimación de la deformación en el desenrollado de la fase interferométrica. A partir de las imágenes SAR la fase de cada píxel sólo se conoce módulo  $2\pi$  (fase enrollada). La estimación de la deformación requiere la reconstrucción de todo el valor de fase a partir de la fase enrollada (fase desenrollada). Esta operación consiste en la estimación de las ambigüedades de fase y representa el paso más crítico de todo el procedimiento DInSAR. En particular, si se trabaja con un solo interferograma, una correcta reconstrucción de la ambigüedad de fase sólo puede lograrse si el gradiente de la fase DInSAR entre los píxeles adyacentes

es menor que  $\pi$ . Teniendo en cuenta que  $\pi$  corresponde a una deformación en la Línea de Visión del Satélite (LOS) de  $\lambda/4$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda del radar (para imágenes de banda-C  $\lambda=5,66$  cm, mientras que para banda-X  $\lambda=3,1$  cm), esto supone claramente un límite en la pendiente máxima del campo de deformación observado. Cabe destacar que el límite solamente se refiere al gradiente de deformación: la deformación máxima observable dependerá del patrón del campo de deformación dada. Para hacer frente a esta limitación puede reducirse el intervalo de tiempo entre las adquisiciones de imágenes SAR.

Por otro lado, para los fenómenos de deformación lenta, el principal interés es la deformación mínima detectable. En estos casos, pueden elegirse largos intervalos de observación, durante los que se pueden adquirir múltiples imágenes SAR, obteniendo así un conjunto redundante de observaciones DInSAR. Esto permite reducir la influencia de los efectos atmosféricos y del ruido, y conseguir estimaciones más precisas y fiables de la deformación. En la literatura encontramos varias técnicas A-DInSAR (Advanced DInSAR) para estimar la deformación de la tierra mediante conjuntos redundantes de observaciones DInSAR. Entre ellas se incluyen la técnica de Permanent Scatterers (Ferretti et al., 2000) y la técnica de Small Baseline Subset (Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2004). Otros enfoques interesantes se describen en Werner et al. (2003), Mora et al. (2003), y Hooper et al. (2004). En el mejor de los casos, la precisión de la velocidad estimada de deformación puede ser inferior a 1 mm/año, por ejemplo, ver Colesanti et al. (2003).

Desde la primera descripción de la técnica, que se basa en datos SEASAT SAR (Gabriel et al., 1989), el DInSAR ha sido utilizado con éxito en una variedad de campos de aplicación, como los deslizamientos (Tamburini et al., 2013), la sismología (Massonnet et al., 1993), la vulcanología (Amelung et al., 2000), la glaciología (Goldstein et al., 1993), los hundimiento del suelo (Galloway et al., 1998), etc. Más detalles sobre los fundamentos DInSAR se pueden encontrar en Rosen et al. (2000), Hansen (2001) y Ferretti (2014).

# 2

## Estimación de movimientos milimétricos con SqueeSAR

Durante años, el análisis InSAR de conjuntos de imágenes se logró mediante el seguimiento de la posición de los reflectores radar muy coherentes llamados Permanent Scatterers (PS), presentes en todo el conjunto de datos. Esta aplicación PS-InSAR (Ferretti et al., 2000) lograba una precisión milimétrica mediante la eliminación de la contribución de ruido de la atmósfera y funcionaba bien en zonas urbanas construidas. La principal limitación era la baja densidad de medidas en áreas con poca o ninguna infraestructura. Para lograr resultados útiles en zonas no urbanas, como minas, reservorios o deslizamientos, se optó por la identificación de medidas conocidas como Distributed Scatterers (DS). El punto de medición DS corresponde a las áreas que tienen respuesta similar a la señal radar. El tamaño de la zona depende del tamaño del píxel y del número de píxeles adyacentes que muestra la misma respuesta a la señal SAR.

Las técnicas avanzadas de procesado, como SqueeSAR™ (Ferretti et al., 2011), que utilizan tanto PS como DS aumentan significativamente la densidad de puntos de medición en entornos no urbanos. De esta manera se amplía la cantidad de medidas obtenidas dando la posibilidad de investigar el movimiento y de controlar muchas zonas no urbanizadas incluyendo regiones montañosas. El algoritmo SqueeSAR™ también produce mejoras en la calidad de las series temporales de desplazamiento. Las áreas homogéneas que producen DS comprenden normalmente varios píxeles. La serie temporal única asignada a cada DS se calcula promediando la serie temporal de todos los píxeles dentro de los DS, lo que reduce efectivamente el ruido en los datos. El número de puntos de PS y DS suele aumentar con el tiempo a medida que se capturan más imágenes, aunque, según la aplicación, se puede compensar en parte con los cambios producidos en el terreno durante el periodo de adquisición ya que esto hace disminuir el número de medidas con respuesta radar estable.

### 3 Aplicación al proyecto CrossRail en Londres

El proyecto CrossRail, gestionado por la sociedad del mismo nombre creada en 2001, construirá la nueva línea de ferrocarril en Londres, Reino Unido, que incluye los 118 km de línea de la conocida como Elizabeth Line que incluyen a su vez 21 km de túneles paralelos en la parte central del trazado. Estos túneles se construyen con un total de ocho tuneladoras que trabajan en paralelo. Las estaciones se construyeron con pozos de pantallas y sostenidos y revestidos mediante hormigón proyectado.

En el contexto de esta obra, se realizó, durante abril de 2011 y agosto de 2013, un trabajo de calibración y evaluación de la coherencia entre los datos obtenidos mediante tecnología InSAR y los datos obtenidos mediante nivelación de precisión. La instrumentación convencional (en algunos casos automatizada) por parte de CrossRail fue dispuesta en todo el trazado de la obra donde la combinación del método de excavación y la necesidad de realizar un bombeo intensivo requería una evaluación de posibles daños en edificios y otras infraestructuras pre existentes. El límite de daños quedó limitado en la categoría II del ábaco de Burland.

#### 3.1. Contexto geotécnico y constructivo de Elizabeth Line

Para la excavación de los 42 km de túnel correspondientes al trazado central de Elizabeth Line, a ejecutar en dos túneles paralelos, se utilizaron un total de 8 máquinas TBM trabajando en cinco lugares (King et al, 2017).

De las ocho máquinas, seis eran del tipo de EPB mientras que las dos que iban a excavar en la zona del acuífero de calcreta fueron del tipo slurry. La tipología de máquinas utilizadas y los túneles excavados se encuentra resumida en la tabla 1 (adaptada de King et al, 2017).

La tabla (adaptada de King et al, 2017) representa la secuencia geológica-geotécnica de los materiales atravesados por las máquinas TBM del tipo EPB en la parte central del trazado.

Concretamente en el subtramo conocido como Drive Y donde se realizaron la mayoría de ejercicios de calibración, la excavación se inició en el pozo Limmo en las arcillas de Londres, pero rápidamente se pasó al grupo Lambeth antes de excavar parcialmente en las arenas de Thanet.

Terreno	Descripción	Potencia (m)
Relleno antrópico	Variable	2 a 5
Aluvial	De blando a firme, arenoso ligeramente gravoso y arcilla orgánica	1.5
Depósitos de terraza aluvial	Arena y grava de densidad media, de fina a gruesa. Nivel piezométrico colgado encima de las arcillas de Londres	1 a 2
Arcillas de Londres	Arcilla fisurada de firme a muy firme	5 a 23
Grupo Lambeth	Estratos variables de firmes a duros, incluyendo arcilla arenosa y arcilla limosa	11 a 20
Arena Thanet	Arena de fina a media, muy densa	3 a 15
Calcreta	Calcreta fracturada de densidad media	-

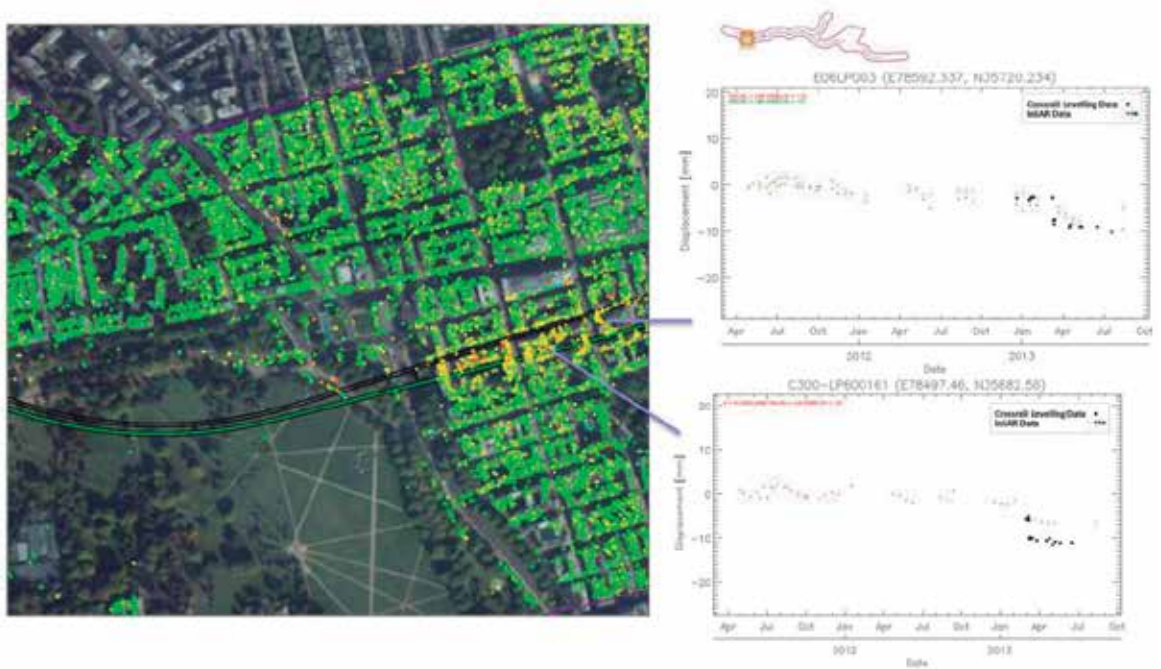


Fig. 1. Time series de correlación en la confluencia entre North Audley Street y Lees PI (García Robles, et al)

### 3.2. Resultados obtenidos

El ejercicio de calibración se realizó con diferentes series temporales (time series) de datos de nivelación de precisión y estaciones totales automatizadas con datos InSAR en periodos de solape. Estas time series de correlación presentan la comparación de los datos con ambas técnicas, completando la información y validando una técnica con la otra. En muchos casos, la cantidad de datos discretos permite solamente un solape temporal breve entre ambos grupos de datos. (García Robles et al).

Los datos InSAR pueden evaluar el patrón de movimiento antes que algunos de los instrumentos in situ hayan sido instalados; por el contrario, la instrumentación in situ tiene una frecuencia de adquisición mayor y por tanto puede establecer de mejor forma la evolución del movimiento en algo más cercano al tiempo real. También es capaz de evaluar los movimientos naturales reales sin ser relativos a la zona de influencia, a la cual está sometida el resto de sensores instalados (manual o automática). Esto permite tener un conocimiento real de la "firma" del terreno y estructuras previo al inicio de las fases de construcción o preparación del terreno.

La figura 1 muestra series temporales de correlación en la proximidad de la confluencia de North Audley Street con Lees PI. El evento de mayor notoriedad es el incremento de movimiento de entre 5 y 6 mm que se produce en marzo de 2013.

El gráfico de correlación en la confluencia entre New Bond Street y Blenheim Street muestra un asiento significativo entre mayo y junio de 2012, seguido de un pequeño levantamiento

hasta enero de 2013. A partir de ahí, el patrón de asiento es lineal hasta agosto de 2013.

En la zona de los alrededores de la estación de Tottenham Court Road se han seleccionado dos series temporales para dicha correlación. El gráfico superior de la figura 3 muestra un comportamiento no lineal en la esquina noreste de Soho Square. Ambos datasets coinciden en el período de solape detectando asiento y un levantamiento súbito justo antes de abril de 2013. La serie temporal inferior muestra un asiento de unos 8 mm en los alrededores de Manette Street.

Dos gráficos de correlación en un edificio en la confluencia de Brady Street y Durward Street pueden observarse en la figura 4. Las series temporales de la nivelación muestran un incremento del asiento de 10 mm en junio de 2013. A pesar de que el gráfico superior y el inferior muestran una evolución diferente en el tiempo, ambos acumulan 10 mm de subsidencia. En la zona oeste del edificio el movimiento se inició en septiembre de 2012 y fue más constante, mientras que en la zona de Brady Street fue más abrupto y duró tan solo un mes (junio de 2013).

De acuerdo con las series temporales de la figura 5, ambos datasets coinciden en la evolución temporal de movimiento no lineal. El movimiento muestra un incremento al final del periodo de estudio, que, de acuerdo con los datos de nivelación, alcanzan los 10 mm de asiento en algunas zonas. El gráfico superior muestra datos relacionados con el puente que cruza el río Lea. El gráfico inferior muestra datos relacionados con la A12.

En los ejemplos de la figura 6, el gráfico superior muestra una zona de ligero asiento no lineal que llega a acumular 10 mm.

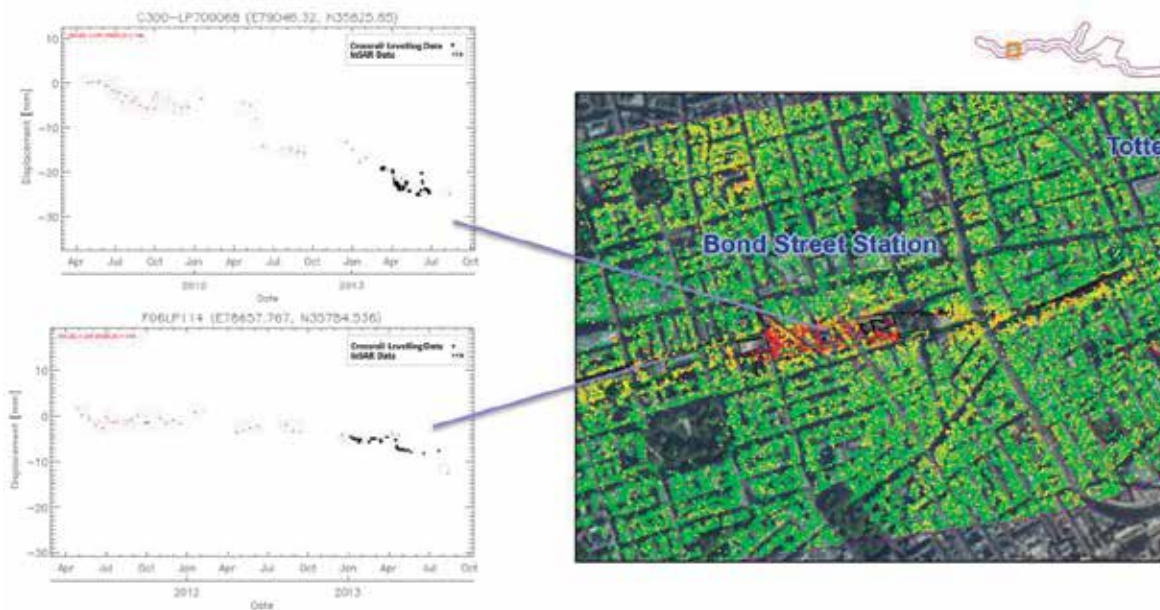


Fig. 2. Serie temporal de correlación en la parte oriental de la estación de Bond Street

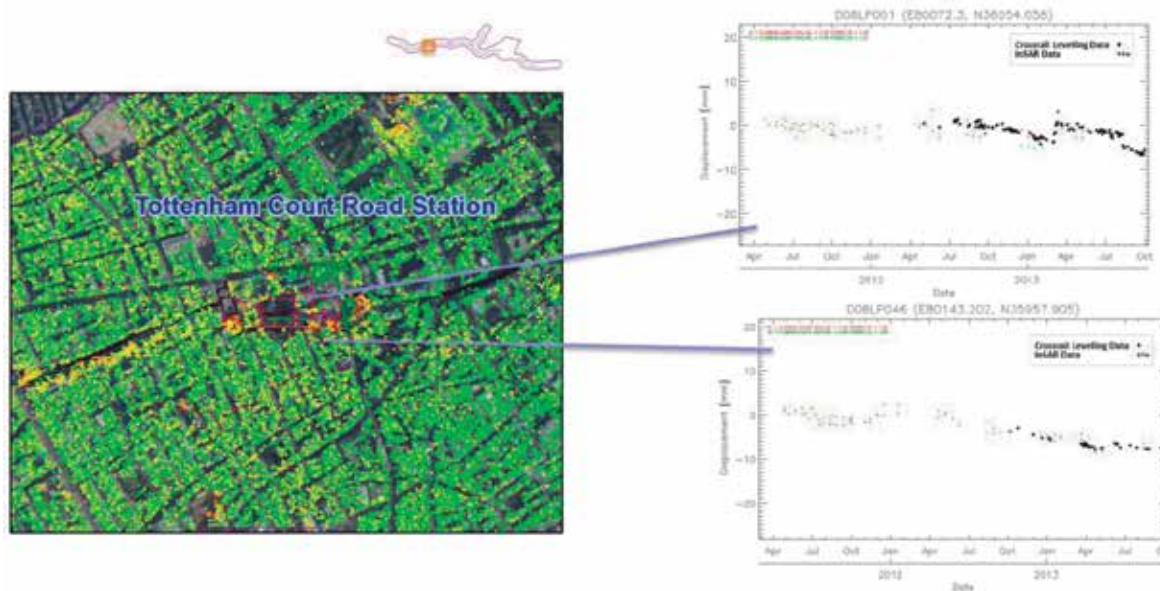


Fig. 3. Series temporales de correlación en la parte este de Tottenham Court Street

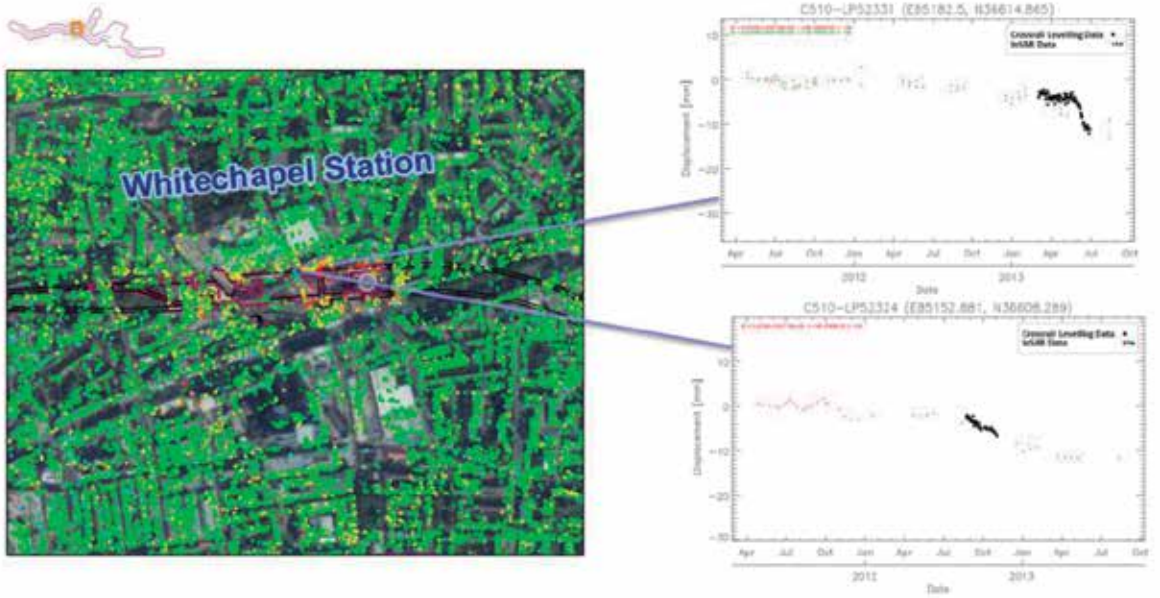


Fig. 4. Series temporales en la zona de Whitechapel Station

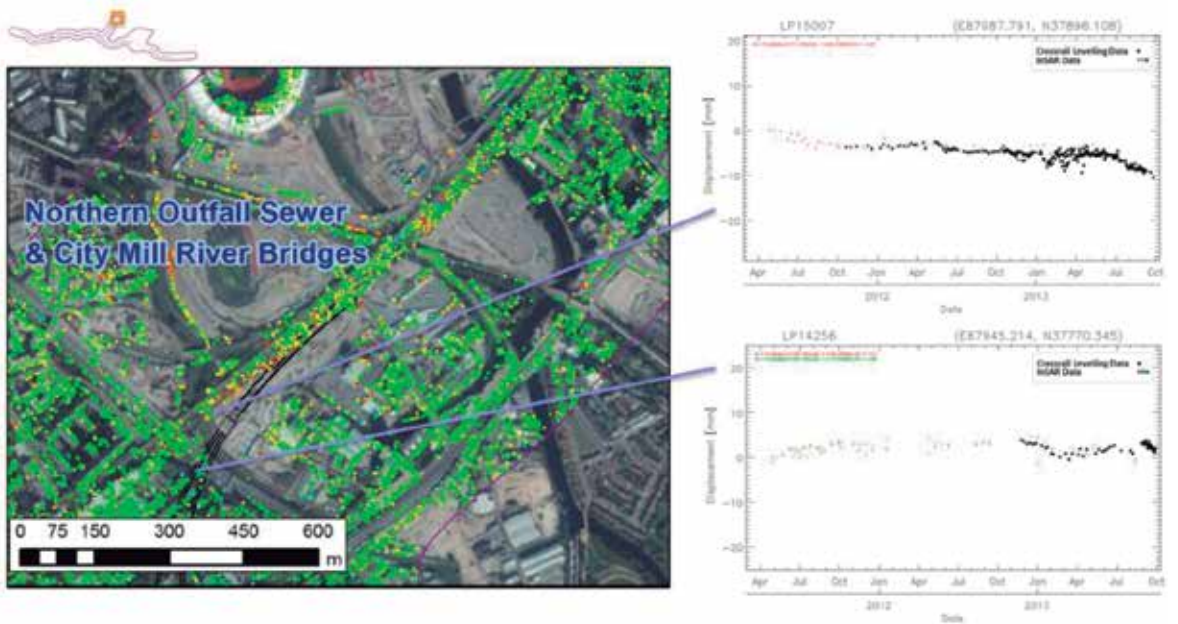


Fig. 5. Series temporales en la zona del Sifón noreste y City Mill River Bridges

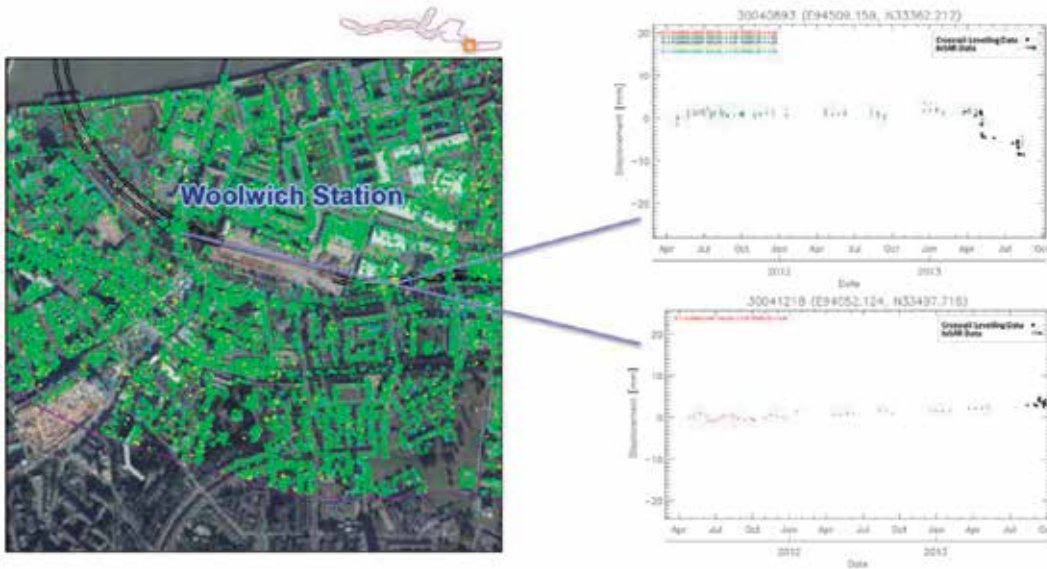


Fig. 6. Series temporales del estudio de correlación de Woolwich Station

## 4 Aplicación a la Canadá Line

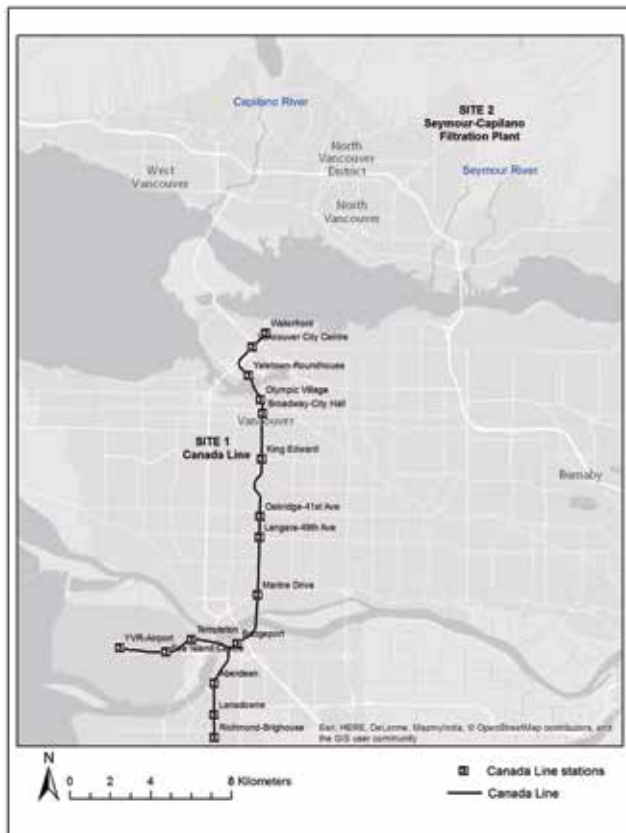


Fig. 7. Localización del área de estudio en el área metropolitana de Vancouver. Localización 1, Canadá Line y localización 2, Túneles paralelos de Seymour-Capilano. Tomada de Falorni et al, 2014

La Canadá Line es la tercera línea de tránsito rápido construida en el sistema de metro SkyTrain del Metro de Vancouver, en esta ciudad de la región de la British Columbia en Canadá. Esta línea conecta Vancouver, Richmond y el aeropuerto internacional de Vancouver.

La Canadá Line (figura 7) se extiende desde Richmond al centro de Vancouver y se ejecutó en dos contextos geotécnicos diferentes. La zona correspondiente al centro de la ciudad y la mayor parte del trazado al norte del río Fraser se excavó en un til glacial competente, mientras que la zona sur se excavó en depósitos deltaicos del río Fraser normalmente consolidados o muy poco sobreconsolidados (Falorni et al, 2014). La zona correspondiente a la trama urbana más densificada se excavó con una tuneladora mientras que entre False Creek y el río Fraser se usó la excavación al abrigo de pantallas del tipo *cut-and-cover*.

Los túneles paralelos del tramo Capilano- Seymour conectan la planta depuradora de Seymour, la mayor de todo Canadá, con el reservorio de Capilano en el norte de Vancouver. Los túneles se usan para transportar agua de los reservorios de Capilano y Seymour a la planta depuradora y que abastece el 70 % de el agua de boca del Metro de Vancouver (Falorni et al, 2014). Los 7,2 km de tuneles de esta parte del trazado se excavaron con una tuneladora, con un diámetro exterior construido de 3,7 m y comprenden también el pozo de introducción de la tuneladora en Seymour de 180 m de profundidad y dos pozos de extracción de 4 m de diámetro y 268 m de profundidad en Capilano (Brox et al, 2005). Estos túneles tienen una cobertura máxima de 605m (Brox et al, 2005).

Las actividades constructivas se iniciaron en 2005 (Falorni, et al 2014).

En el estudio interferométrico de movimiento, se procesó un conjunto de 58 imágenes del sensor Radarsat 1, de alta resolución y que opera en banda C, entre marzo de 2001 y junio de 2008, con una frecuencia de adquisición de 24 días. Se obtuvo, por tanto, información de alrededor cuatro años antes del inicio de las obras, lo que permitió tener una imagen clara del comportamiento del terreno y las estructuras cercanas a la traza del túnel antes de su excavación.

#### 4.1. Resultados obtenidos

##### 4.1.1 Canadá Line

Durante el período de estudio se detectaron diferentes áreas de asiento asociados a los terrenos arcillosos blandos del río Frase en la alineación sur de la Canada Line, mientras que no se detectaron movimientos significativos en la porción norte.

En la sección de la excavación entre pantallas en Cambie Street no se detectó movimiento asociado a la excavación.

La figura 8 (Falorni et al, 2014) representa la totalidad de los datos obtenidos en la totalidad de la zona del proyecto.

La figura 9 (tomada de Falorni et al, 2014) muestra los datos de velocidad de desplazamiento anual (en milímetros por año) de los datos obtenidos antes del inicio de las excavaciones y de los datos obtenidos con la excavación en curso. Esto obviamente permite detectar aquellas zonas donde la excavación ha provocado desplazamientos en la superficie.

La figura 10 muestra las series temporales de edificios situados a ambos lados del eje de la excavación en el corredor excavado entre pantallas en Cambie Street, entre las estaciones de



Fig. 8. Velocidad de deformación en el período 2001-2008 de la traza de la Canada Line



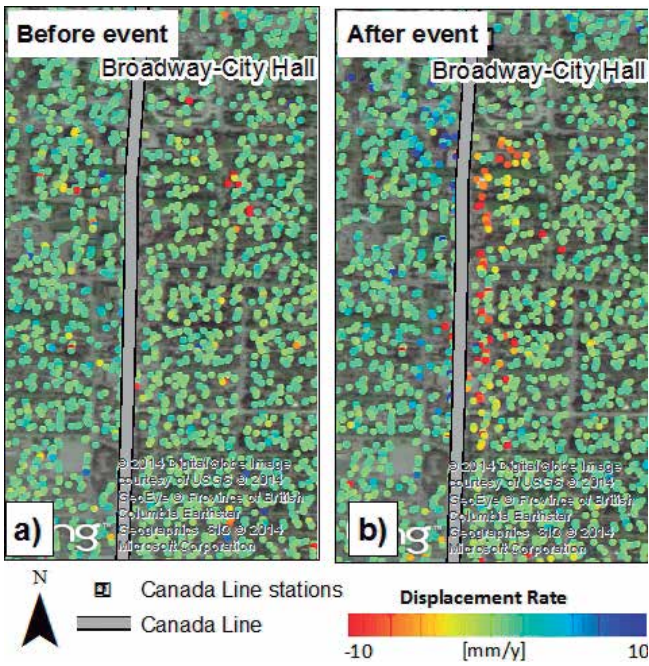


Fig. 9. Resultados de la zona excavada entre pantallas en el corredor de Cambie Street. a) Desplazamiento anual antes del inicio de la excavación y b) desplazamiento anual durante la excavación

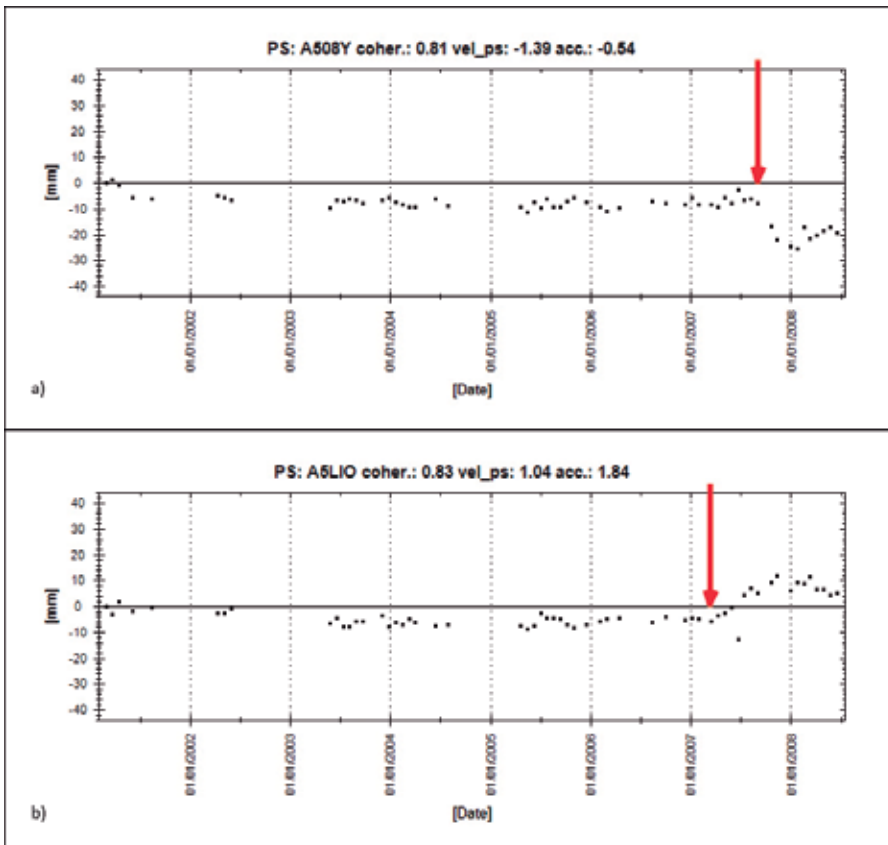


Fig. 10. a) Punto de medida que muestra un desplazamiento alejándose del sensor después de 2006, que puede interpretarse como un movimiento horizontal hacia la excavación. b) Punto de medida que muestra un desplazamiento hacia el sensor después de 2006, que puede interpretarse como un movimiento hacia el interior de la excavación

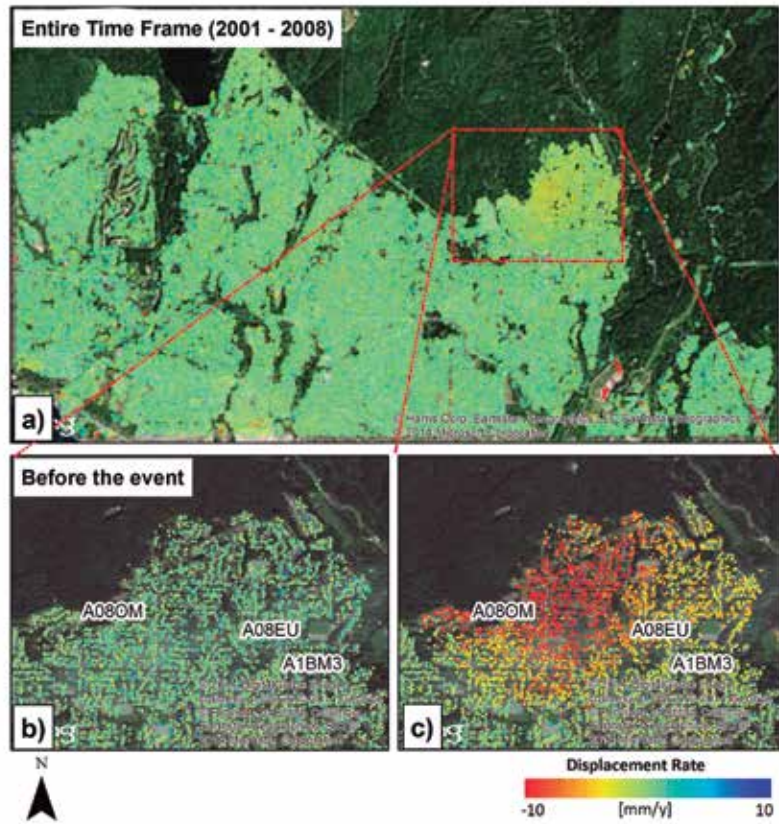


Fig. 11. a) Velocidad anual sobre North Vancouver en el período 2001-2008. b) Velocidad anual antes del inicio de la excavación. c) Velocidad anual durante la excavación.

Broadway City Hall y King Edward. En este gráfico se puede observar que la zona es estable hasta mediados de 2007, un movimiento brusco de unos 2 cm en julio de 2007 y una posterior estabilización.

Los edificios situados al oeste del corredor aparecen azules en la figura 11b indicando un acercamiento al sensor, mientras que los situados al este aparecen rojos indicando un alejamiento del sensor. Esto se refleja también en las series temporales de la figura 12 a y 12b de la misma forma. Este hecho puede fácilmente ser interpretado como un movimiento horizontal hacia el interior de la excavación.

#### 4.1.2 Túneles Seymour-Capilano

El mismo stack de imágenes Radarsat fue usado para analizar la zona de los túneles hidráulicos de Seymour-Capilano. Concretamente se analizó una zona de unos 10 km<sup>2</sup> (rectángulo rojo de la figura 11). En esta zona el eje del túnel pasa por debajo de una zona residencial en North Vancouver. El asiento provocado por la excavación del túnel es suficiente como para producir un efecto en la velocidad anual de un período de 7 años. Este efecto se puede comprobar en los colores amarillos de la porción central del rectángulo rojo de la figura 11a.

El análisis de las series temporales obtenidas indica que temporalmente los primeros indicios de desplazamiento aparecen en zonas cercanas a la planta depuradora, justamente donde se inició la excavación del túnel, como se puede comprobar en la figura 12a. La serie temporal de la figura 12b indica que los desplazamientos empiezan a ser significativos a mitad de

2006, mientras que los de la figura 12c empiezan a mitad de 2007. En este último caso, el desplazamiento obtenido es claramente el mayor de los tres analizados.

El análisis detallado de las figuras 11b y c indica evidencias de las diferentes velocidades de desplazamiento que se inicia en el sureste y avanza hacia el noroeste, donde las velocidades son significativamente mayores.

## 5 Conclusiones

El uso de la tecnología InSAR en proyectos de túnel y obra subterránea permite:

- Utilizar los archivos históricos para, una vez procesados estos datos, tener información del comportamiento de la zona previo al inicio de los trabajos de excavación. Esta información en fase de proyecto permite ajustar el trazado y los parámetros de excavación y obtener información frente a posibles reclamaciones.
- Tener mapas de deformación con precisión milimétrica que van más allá (temporal y espacialmente) de las zonas cubiertas por la instrumentación convencional.
- El InSAR complementa por tanto, la información obtenida mediante otras técnicas de monitoreo convencional. 📍

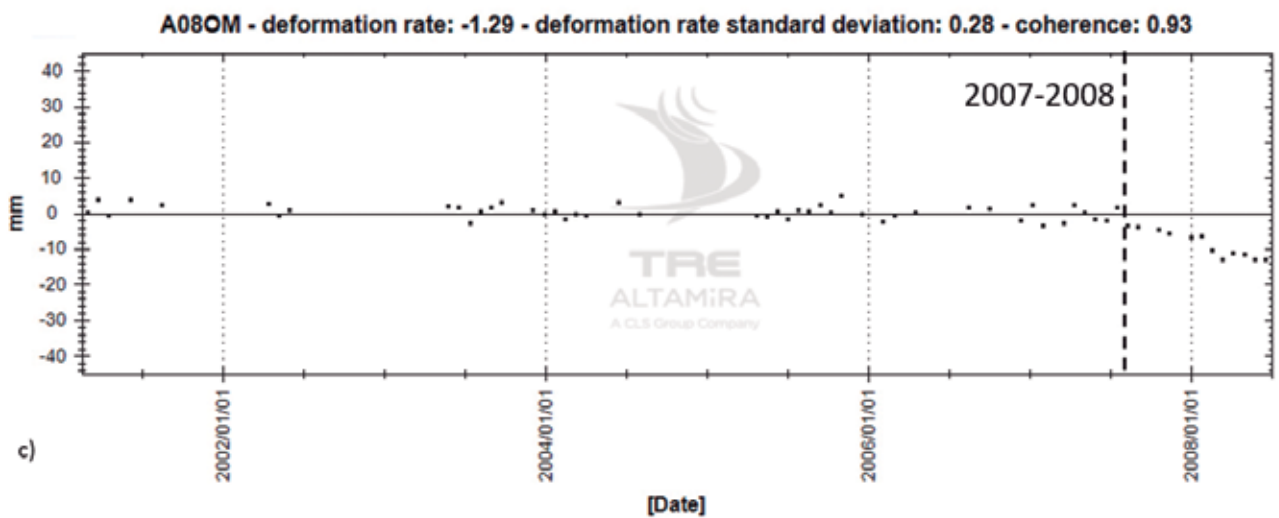
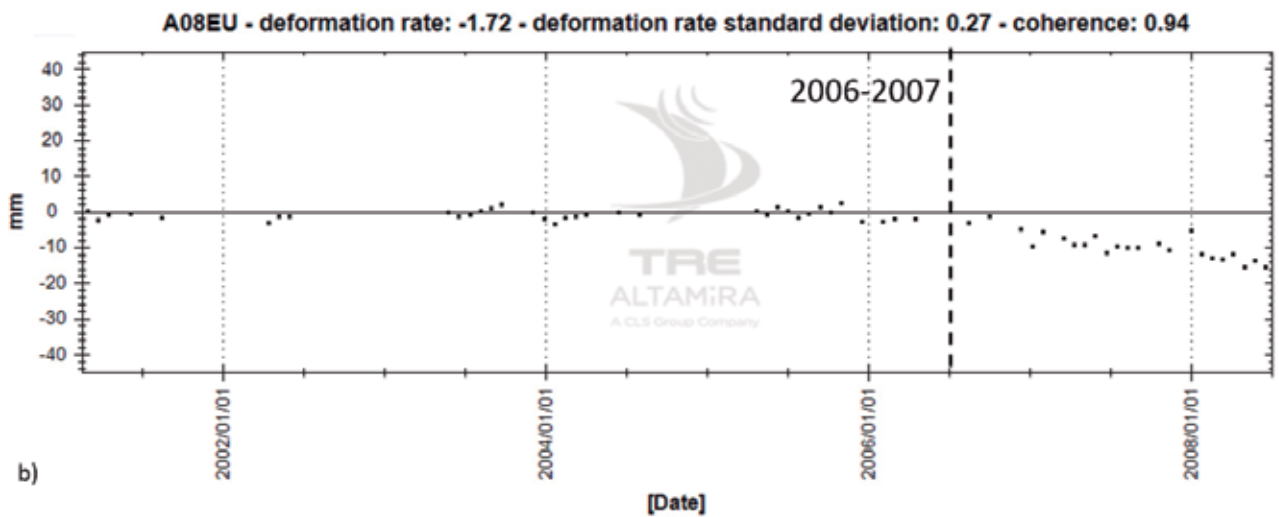
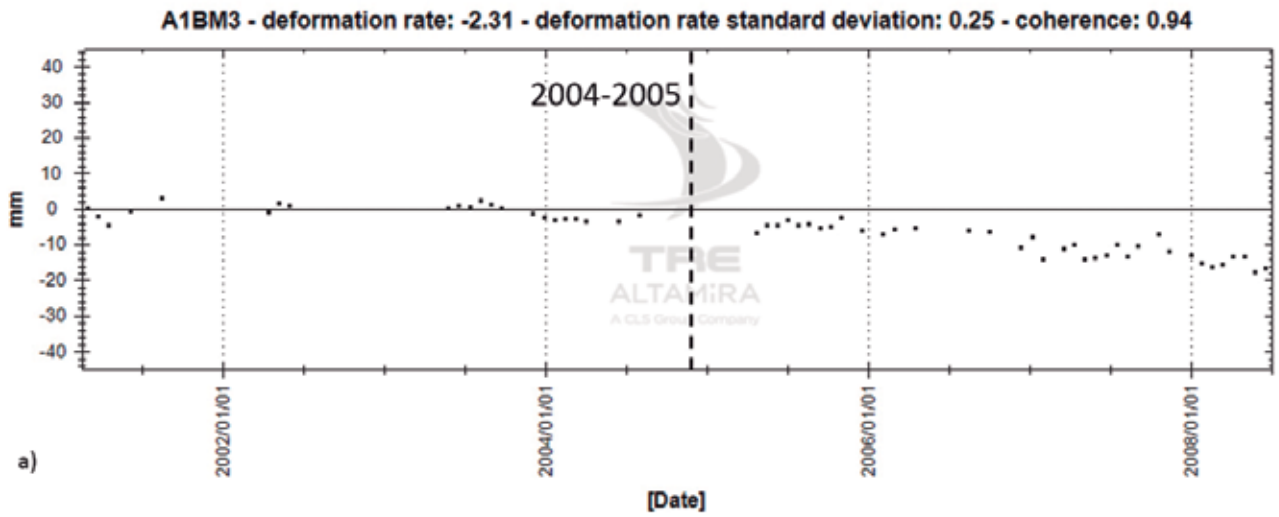


Fig. 12. Series temporales de puntos de medición identificados en la figura 13. a) Serie temporal del punto A1BM3; b) Serie temporal del punto A08EU y c) Serie temporal del punto A08OM

## REFERENCIAS

- Arnaud, A., Adam, N., Hanssen, R., Inglada, J., Duro, J., Closa, J., and Eineder, M. (2003). "ASAR ERS interferometric phase continuity". IGARSS 2003, 21-25 July 2003, Toulouse, France, CDROM, 2003.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002). "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), 2375-2383.
- Black, M. "Crossrail project: managing geotechnical risk on London's Elizabeth Line". Civil Engineering Vol 170 Issue CE5 pp 23-30
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. (2003). "SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Technique". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(7), 1685-1701.
- Duro, J., Inglada, J., Closa, J., Adam, N., Arnaud, A. (2003). "High resolution differential Interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data". Fringe 2003, Frascati, Rome, Italy, 1-5 December.
- Falorni, G., Iannacone, JP. (2014). "Signature of Tunneling-Induced Ground deformation in urban areas revealed by time series analysis." In proceedings Vancouver TAC 2014. Tunneling in a resource driven world.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2000). "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry". Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(5), 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). "Permanent scatterers in SAR interferometry". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8-20.
- Ferretti, A. (2014). "Satellite InSAR Data. Reservoir Monitoring from Space". EAGE Publications.
- Garcia Robles, J., Black, M., Salvá, G. "Correlation study between in situ auscultation and satellite interferometry for the assessment of nonlinear ground motion on CrossRail London."
- Hanssen, R. (2001). "Radar interferometry". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B. (2004). "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR Persistent Scatterers". Geophysical Research Letters, 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.
- King, M. Thomas, I. Stenning, A. "Crossrail project: machine driven tunnel on the Elisabeth line, London". Civil Engineering Volume 170, Issue CE5. Pp 31-38
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E. (2004). "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms". IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 42(7), 1377-1386.
- Massonnet, D and Feigl, K L. (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface". in Rev. Geophys., 36(4), 441-500, doi: 10.1029/97RG03139.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabaute, T. (1993). "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry". Nature, 364, 138-142.
- Mora, O., Mallorquí, J.J., Broquetas, A. (2003). "Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images". IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 41(10), 2243 -2253.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodríguez, E., Goldstein, R.M. (2000). "Synthetic Aperture Radar Interferometry". Proc. of the IEEE, 88 (3), 333-382.
- Sabater, J., Duro, J., Albiol, D., Koudogbo, F. (2011). "Comparative analyses of multi-frequency PSI ground deformation measurements". SPIE Remote Sensing 2011, Prague, Czech Rep, 19-22 September.