



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

MONITORIZACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO DE LA METRÓPOLIS DE WARRI (NIGERIA), POR MEDIO DE LA TÉCNICA MULTI-TEMPORAL DE INTERFEROMETRÍA RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (MT-INSAR)

Alumno/a: Arroyo Parras, Juan Gabriel

Tutor/a: Prof. D. Antonio Miguel Ruiz Armenteros
Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y
Fotogrametría

Diciembre, 2017



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a Antonio, mi tutor, todo su esfuerzo y paciencia, sin él este trabajo fin de máster no habría sido posible.

También agradecer a toda la organización y el profesorado del máster que se implicó verdaderamente para que los alumnos adquiriéramos unos adecuados conocimientos.

Finalmente, quiero agradecer el apoyo incondicional de mi familia y amigos que han estado ahí en todo momento.



RESUMEN

La técnica InSAR tiene un gran desarrollo para la cuantificación de deformaciones ocurridas en la superficie terrestre, ya sean aquellas producidas por fenómenos tectónicos como es el caso de los terremotos, por subsidencias o abombamientos de edificios volcánicos o por procesos externos como movimiento de glaciares, grandes deslizamientos, cargas mareales, subsidencias motivadas por extracción de agua e hidrocarburos, etc.

En este estudio se aplicó la técnica de Interferometría Radar de Apertura Sintética Multi-Temporal (MT-InSAR) para monitorizar la deformación de la tierra en la metrópoli Warri en el período comprendido entre el 09/02/2006 y el 12/08/2010 con datos de Envisat obtenidos de la Agencia Espacial Europea (ESA). Warri es una de las mega ciudades en el estado de Delta en la región costera de Nigeria que alberga gran número de industrias. Una de las tres refinerías de petróleo de Nigeria se encuentra en Warri.

El procesado se realizó utilizando el método InSAR multi-temporal de Stanford para dispersores persistentes (StaMPS). A partir del análisis de los resultados, se está produciendo una deformación del terreno en la metrópoli de Warri a tasas moderadas (± 5 mm / año).



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	4
4. DATOS DE PARTIDA Y RECURSOS EMPLEADOS.....	5
4.1. Imágenes SAR, Modelo Digital de Elevaciones y Órbitas Precisas	5
4.2. Software empleado.....	6
5. METODOLOGÍA.....	8
5.1. Procesado interferométrico a partir de una sola imagen	13
5.1.1. Elección de la imagen Master	14
5.1.2. Pre-procesado SLC	15
5.1.2.1. Lectura y recorte (Reading and Cropping)	15
5.1.3. Creación de Interferogramas (DORIS).....	18
5.1.3.1. Sincronización (Timing).....	18
5.1.3.2. Obtención de órbitas precisas	18
5.1.3.3. Co-registro	19
5.1.3.4. Corrección manual del desplazamiento del DEM	26
5.1.3.5. Cálculo de la fase de referencia del DEM	27
5.1.3.6. Re-muestreo de la imagen slave	28
5.1.3.7. Creación del interferograma	30
5.1.3.8. Geocodificación	32
5.2. Procesado PSI.....	33
5.2.1. Cargar datos	33
5.2.2. Estimación del ruido de fase.....	34



5.2.3.	Selección de PS.....	34
5.2.4.	Criba de PS	34
5.2.5.	Corrección de fase	34
5.2.6.	Desenrollado de fase (unwrapping)	36
5.2.7.	Estimación del error de “look-angle” espacialmente correlado.....	38
5.3.	Procesado Small Baseline (SB).....	46
5.4.	Procesado Combinado MTI	51
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	55
7.	CONCLUSIONES.....	75
8.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.	76



1. INTRODUCCIÓN

La interferometría radar de apertura sintética (InSAR) es una potente técnica geodésica que permite la detección remota de deformaciones producidas en la superficie de la Tierra, y que es ampliamente utilizada para medir desplazamientos asociados a terremotos, actividad volcánica, deslizamiento de laderas, y muchos otros fenómenos. La capacidad de abarcar zonas de gran extensión (resolución espacial) de forma remota y a la vez ofrecer una muy aceptable precisión en la medida de desplazamientos, la convierte en una técnica muy atractiva para la comunidad científica. A partir de dos imágenes SAR de la misma zona en dos épocas distintas de adquisición, se evalúan las diferencias en los observables de ambas, para así cuantificar y modelar el posible desplazamiento producido en la superficie terrestre. Sin embargo, los cambios producidos en el tiempo (coherencia) en las propiedades de dispersión (de la señal de microondas) de los objetos observados y la dirección de observación del sensor SAR, limitan la aplicabilidad de la técnica. Donde la medición es posible, la señal debida al desplazamiento del terreno queda enmascarada por el ruido de la señal debido a las variaciones en las propiedades de la atmósfera y la inexactitud tanto en la órbita de los satélites como en la determinación de la altura de la superficie. Las técnicas multi-temporales, que implican el procesamiento de múltiples adquisiciones en el tiempo, proporcionan una manera de abordar estas cuestiones y superar así las limitaciones de InSAR.

Durante mucho tiempo, un gran porcentaje de los resultados de aplicaciones InSAR eran obtenidos únicamente mediante el análisis de interferogramas individuales derivados de un solo par de imágenes SAR. Esto sigue siendo así en la actualidad tras grandes terremotos por ejemplo, donde la deformación del terreno es tan grande que hace que predomine esta señal en la fase de los interferogramas. La gran evolución de las técnicas InSAR en las últimas tres décadas, han servido de base para una mayor explotación de las escenas SAR, sobre todo en referencia a las técnicas multi-temporales. Esto ha permitido optimizar la calidad de los resultados y aplicar InSAR en otros ámbitos, como el de la ingeniería civil y la creación de modelos sísmicos de esfuerzos. Una de estas técnicas multi-temporales, es la técnica de interferometría por dispersores permanentes (PSI).

El objetivo principal detrás de la técnica PSI, es el de identificar objetivos individuales, llamados dispersores persistentes (PS), que sean coherentes durante intervalos de tiempo largos, es decir, que mantengan la amplitud (intensidad) de la señal. Estos objetivos PS, influyen en que la intensidad total de la señal que ofrecen todos los dispersores de una celda observada, y procura que se mantengan casi invariantes en el tiempo.

Desde el punto de vista del estudio que ocupa este trabajo fin de máster, la justificación se presenta en base a las características de la zona costera de Nigeria. En esta zona, la deformación del terreno se ha acelerado por la retirada indiscriminada de fluidos,



incluyendo petróleo y gas particularmente en las ciudades de Warri, Yenagoa y Port Harcourt de los acuíferos subterráneos. La deformación del terreno asociada con el resultado de la extracción de fluidos de los acuíferos y la reducción de presión en éstos, conduce directamente a un aumento de la tensión efectiva en el sistema. En consecuencia, la cuenca se compacta y se desploma. Los registros disponibles también han mostrado algunas fallas estructurales, sobre todo en las zonas más costeras de Nigeria, que se sospecha que puedan ser causadas por su naturaleza sedimentaria y la extracción excesiva de agua, petróleo y gas subterráneos. Las mega-ciudades de la región costera de Nigeria están altamente pobladas e industrializadas, por lo que la necesidad de agua está aumentando progresivamente en el área de estudio. Debido a estas necesidades de abastecimiento, se ha dado producido una explotación no controlada de aguas subterráneas que pudiera desembocar en peligrosas consecuencias (*Mahmud et al., 2016*). Todo esto es justificación suficiente como para tener en cuenta las deformaciones producidas en la ciudad de Warri, con el fin de prever deformaciones del terreno que acarreen consecuencias no deseadas.

En este estudio se utilizan técnicas multi-temporales (MT-InSAR), con diferentes enfoques, para controlar la deformación de la superficie producida en la ciudad de Warri (Nigeria) entre el periodo de 09/02/2006 y 12/08/2010.



2. OBJETIVOS

Los objetivos fundamentales de este trabajo son:

- Aprender una metodología de procesamiento avanzado de interferometría radar de satélite (MT-InSAR), en concreto, la desarrollada en el software StaMPS/MTI.
- Procesar, aplicando StaMPS/MTI, un conjunto de imágenes SAR correspondientes al satélite Envisat ASAR sobre Nigeria obtenidas entre el 09/02/2016 y el 12/08/2010.
- Comparar las distintas técnicas multitemporales de procesamiento implementadas en el software StaMPS/MTI, como son, PSI, SBAS y la combinación de ambas.
- Generar mapas de deformaciones y velocidades medias así como series temporales de la deformación en distintos puntos de interés.
- Analizar las deformaciones obtenidas en la ciudad de Warri que puedan servir de apoyo a la toma de decisiones oportunas en base a las mismas.



3. ÁREA DE ESTUDIO

Warri es una de las mega-ciudades industrializadas del estado de Delta en la región costera de Nigeria. Una de las tres refinerías de petróleo de Nigeria se encuentra en Warri. Esta ciudad se encuentra acotada en latitud entre 5° 30' N y 7° 35' N, y en longitud entre 5° 29' E y 5° 48' E (Fig. 1). Se compone de tres consejos locales de administración, Warri Sur, Udu y Uvwie, y tiene una población de alrededor de 536023 habitantes según el Censo Nacional de Población de 2006. La metrópoli de Warri tiene una superficie de aproximadamente 453 km² de extensión. La topografía es plana, con promedio de aproximadamente 13 m por encima del nivel del mar. El relieve tiene unas características planas y bajas, propiciando así inundaciones frecuentes después de eventos de lluvia. El modelo de drenaje es dendrítico, con los principales afluentes desembocando en el río Forcados. La vegetación del área de estudio es húmeda, tipo selva tropical, y se compone de abundantes árboles y pastos.

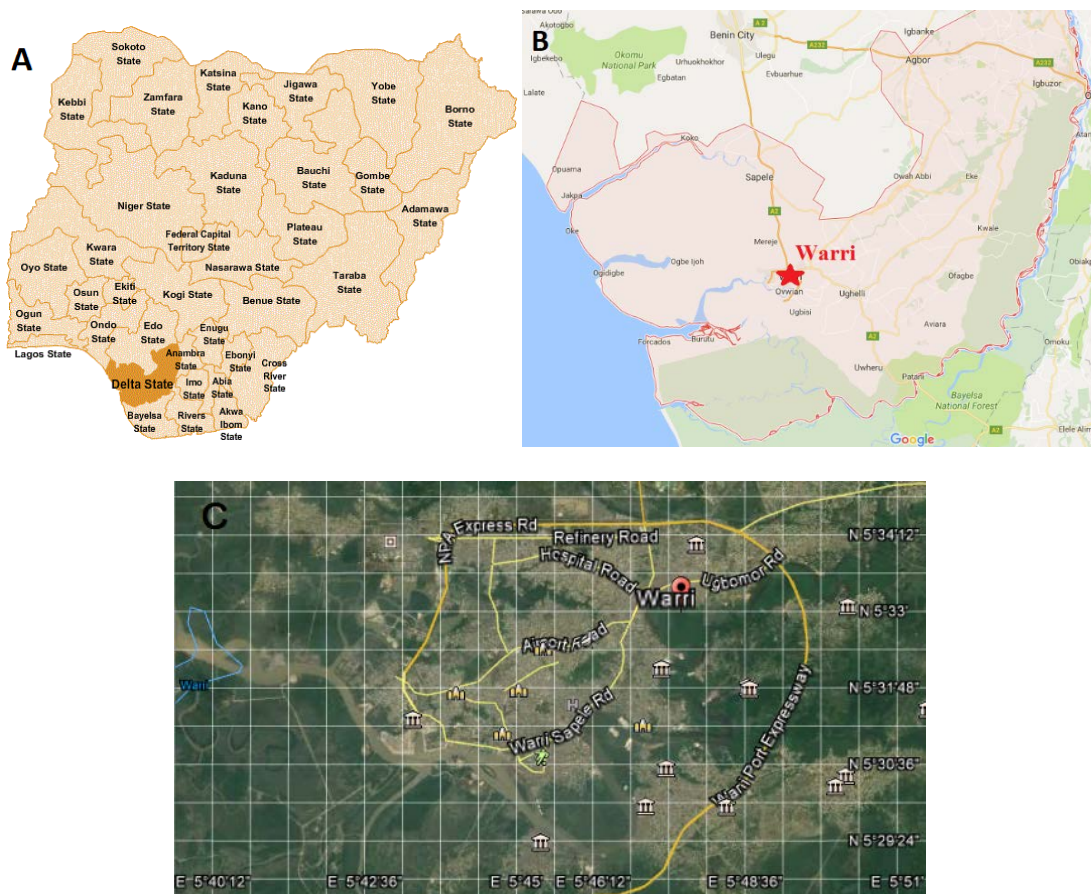


Fig.1. Localización de la zona de estudio. A. Mapa de Nigeria con la localización del estado de Delta en el suroeste. B. Estado de Delta. C. Ciudad de Warri.



4. DATOS DE PARTIDA Y RECURSOS EMPLEADOS

En esta sección se describen los datos y software utilizados para llevar a cabo este estudio.

4.1. Imágenes SAR, Modelo Digital de Elevaciones y Órbitas Precisas

- **Imágenes SAR**

En este estudio multi-temporal, se han utilizado 23 escenas (track 36) Envisat ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) de la banda C (longitud de onda = 5.6 cm) y órbita descendente. Estas escenas fueron adquiridas entre el 09/02/2006 y el 12/08/2010, y han sido proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA), en el marco del proyecto 30934 CAT-1 (Subsidence Monitoring in the coastal área of Nigeria using Multi-temporal InSAR techniques), como productos de Nivel 1 en formato SLC (Single Look Complex).

Los datos en formato SLC, son datos en formato complejo ya “enfocados” (en rango y acimut) a partir de datos originales brutos (raw), georeferenciados y provistos en geometría de vista lateral (oblicua). Las imágenes SAR en formato complejo (SLC), poseen una parte imaginario y una parte real, a partir de las cuales se puede determinar los valores de amplitud (intensidad) y fase.

No hay datos sobre esta área de estudio de otros sensores SAR a bordo de vehículos espaciales hasta que Sentinel-1A comenzó a adquirir datos en 2014, por lo que no es posible llevar a cabo un análisis histórico de la deformación antes de 2006 utilizando interferometría radar por satélite.

- **Modelo Digital de Elevaciones (DEM)**

El modelo digital de elevaciones (DEM) que se ha usado en este estudio, proviene de los datos proporcionados por la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) del USGS (NASA) *Farr et al. (2007)*. Este DEM tiene una resolución geográfica de 3 segundos de arco (~ 90 m en el ecuador) y una precisión de 10 m en altura.

- **Órbitas precisas**

Las órbitas de los satélites utilizados son proporcionadas por la Universidad de Tecnología de Delft (Países Bajos) y la Agencia Espacial Europea (ESA). Vienen dadas en un conjunto de archivos ODR (registros de datos orbitales).



4.2. Software empleado

Todo el software empleado en este estudio es de libre disposición y uso no comercial, y ha sido compilado y ejecutado sobre entorno Linux. Los paquetes de software principales utilizados como procesadores InSAR son Doris y StaMPS. El resto, es software complementario que se encarga de realizar tareas específicas integradas dentro del procesamiento general de Doris y StaMPS.

- **Doris (Delft Object-oriented Radar Interferometric Software)**

El Instituto de Delft para la observación de la Tierra y Sistemas espaciales de la Universidad Tecnológica de Delft (DEOS), ha desarrollado Doris, un procesador InSAR con programación orientada a objetos y estructura modular. Doris es un software de libre disposición para la comunidad científica, que es capaz de procesar datos ERS-1/2, Envisat, JERS, RADARSAT, ALOS, TerraSAR-X, COSMO-SkyMED y desde junio de 2017, Sentinel-1A/1B. Doris no puede procesar datos SAR brutos (formato raw), por lo que los datos deben de estar enfocados (en formato SLC). Este software permite obtener productos interferométricos finales, tales como modelos digitales de elevación y mapas de desplazamiento del terreno (*Kampes et al., 2003*).

- **StaMPS / MTI**

StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) es un paquete de software que implementa el método InSAR de dispersores persistentes (PS). Este paquete fue ampliado posteriormente con la implementación del método de pequeñas líneas-base (SBAS) y el método multi-temporal combinado (MTI). El desarrollo principal de StaMPS/MTI fue llevado a cabo por la Universidad de Stanford, pero el desarrollo posterior ha tenido lugar en la Universidad de Islandia, la Universidad Tecnológica de Delft y la Universidad de Leeds (*Hooper et al., 2004, 2007*). StaMPS hace uso del software Doris, para algunos de sus procesos, por lo que necesita de datos SLC; es por ello que incluye un módulo para “enfocar” datos SAR brutos a datos SLC.

- **Getorb**

Getorb es un software programado en Fortran, desarrollado por el Instituto de Delft para la observación de la Tierra y Sistemas espaciales de la Universidad Tecnológica de Delft (DEOS). El objetivo de este paquete de software es el de manejar los registros de datos orbitales (ODRs). Contiene aplicaciones varias para interpolar órbitas y realizar conversiones de épocas.



- **Snaphu**

El software Snaphu implementa un algoritmo estadístico de flujo de red propuesto por Chen y Zebker (*Chen y Zebker, 2000; Chen y Zebker, 2001; Chen y Zebker, 2002*), con el objetivo de desenvolver la fase (unwrapping) de un interferograma. Está escrito en lenguaje de programación C, y el formato predeterminado para el archivo de entrada es un archivo complejo.

- **Triangle**

Triangle es un software creado en la Universidad Carnegie Mellon, como parte del proyecto Quake (herramientas para la simulación de terremotos a gran escala). Se encarga de generar triangulaciones exactas, triangulaciones constreñidas, triangulaciones de Delaunay, diagramas de Voronoi, y mallas trianguladas de alta calidad (*Shewchuk, 1996; Shewchuk, 2002*).



5. METODOLOGÍA

La Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR), también conocida como interferometría SAR, es la medición del cambio de la fase de la señal en el tiempo. En los últimos años, la técnica espacial InSAR ha recibido mucha atención por su capacidad sin precedentes (al nivel centimétrico/milimétrico) de generar mapas de deformación. SAR consigue una resolución relativamente buena usando una pequeña antena de radar, que es un tema importante cuando se trata de satélites que deben ser limitados en tamaño y consumo de energía. Para lograr esta alta resolución, el SAR utiliza el movimiento de la única antena de radar a lo largo de un trayecto de vuelo (u órbita) para formar una "antena sintética" que es mucho más grande que la actual. Esto mejora la resolución del radar a lo largo de la trayectoria (dirección azimutal). Para lograr una alta resolución en la trayectoria transversal, o en el sentido de la distancia, el radar utiliza una forma de onda modulada en frecuencia y compresión de impulsos para simular un pulso muy corto, de ahí un eco de alta resolución. La resolución espacial horizontal típica, obtenida a través del satélite SAR actual, oscila entre 8 y 150 m, y las resoluciones típicamente usadas para InSAR están entre 5 y 30 m. Esto es apropiado para separar áreas edificadas de otro tipo de uso del suelo y con ello la delineación de los cuerpos de la ciudad. Los datos SAR de alta resolución de los nuevos sensores SAR como TerraSAR-X, COSMO-SkyMED y Radarsat-2 aumentaron significativamente el nivel de detalles visibles en las imágenes SAR. Con ello, es posible la detección y mapeo de edificios, estructuras de ciudades e infraestructuras como carreteras y ferrocarriles. Estas características son de interés para fines de mapeo y monitoreo. La alta resolución permite además obtener medidas de textura significativas.

Los sensores de SAR montados en satélites transmiten señales de microondas hacia un área objetivo, parte de los cuales se reflejan de nuevo en el satélite. Estas señales "retrodispersadas" son leídas y almacenadas por el sensor de radar para formar imágenes SAR del área objetivo. Estas imágenes son complejas ya que contienen dos componentes por píxel, a partir de los cuales se puede derivar la amplitud y la señal de fase. Las técnicas interferométricas para la detección y medición de la deformación del suelo explotan la información contenida en la fase radar de al menos dos imágenes SAR complejas adquiridas en diferentes épocas sobre la misma área, generalmente adquiridas a partir de geometrías de imagen ligeramente diferentes, formando un interferograma. Un interferograma de SAR es una comparación (diferencia) de las matrices de fase de dos imágenes de SAR adquiridas sobre la misma área (*Bamler y Hartl, 1998; Rosen et al., 2000*). En condiciones ideales (términos de ruido insignificantes e idénticos en términos de fase debido a la reflectividad de los efectos objetivo y atmosférico), los valores de fase de un interferograma son simplemente proporcionales a los valores de desplazamiento que afectan al área de interés entre la primera y la segunda adquisiciones. Así, pares de imágenes del mismo área objetivo pueden ser comparadas para medir cambios en la superficie del suelo, tales desplazamientos que han ocurrido en el lapso de tiempo entre las dos adquisiciones



(Hanssen, 2001). Como consecuencia, cualquier desplazamiento de un objetivo de radar a lo largo de la línea de visión del satélite crea un desplazamiento de fase en la señal de radar que puede ser detectado comparando los valores de fase de dos imágenes de SAR adquiridas en momentos diferentes.

Cuando se mueve un punto P en el suelo, también cambia la distancia entre el sensor y el punto en el suelo y, por lo tanto, también afectará el valor de fase registrado por un sensor SAR que vuela a lo largo de una órbita fija. La Fig. 2 muestra la relación entre ese movimiento del terreno y el desplazamiento correspondiente en la fase de la señal entre dos señales SAR recibidas sobre la misma área. Ignorando cualquier retardo temporal ocasionado por el hardware generador de imágenes, la fase interferométrica estimada ($\Delta\phi$) puede estar directamente relacionada con la diferencia en la longitud de la trayectoria a un objetivo desde la plataforma de formación de imágenes, en la dirección de línea de visión (LOS), en forma de la Ec. (1):

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R + \phi_{atm} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda, ΔR representa cualquier rango (distancia entre el sensor y el objetivo) de desplazamiento del objetivo del radar y ϕ_{atm} es un cambio de fase debido a las diferentes condiciones atmosféricas en el momento de las dos adquisiciones de radar, distorsión de longitud de onda que ocurre cuando las señales atraviesan una capa que contiene humedad. La fase interferométrica puede ser descompuesta en los siguientes componentes (Ec. (2)):

$$\Delta\phi = \phi_{defo} + \phi_{atm} + \phi_{topo} + \phi_{noise} \quad (2)$$

donde ϕ_{topo} se debe a las distorsiones topográficas que surgen de ligeramente diferentes ángulos de visión de los dos pasos de satélite y ϕ_{noise} se debe a otros términos incluyendo la ionosfera y el ruido del sistema.

Está claro que las dificultades relacionadas con la estimación de las señales de deformación superficial del interferograma SAR simple se deben esencialmente a la presencia de efectos de decorrelación (contribuyendo al nivel de ruido), el impacto de la topografía local sobre los valores de fase y la presencia de componentes de la fase atmosférica superpuestos sobre la señal de interés.

Para los estudios de deformación de la corteza, ϕ_{defo} es el único término de interés, y otros términos son corregidos o tratados como ruido. ϕ_{topo} puede ser estimado utilizando una información precisa de la órbita, un modelo elíptico o esférico para la superficie de la Tierra y un Modelo Digital de Elevación (DEM), como por ejemplo de la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Farr et al., 2007) u otro interferograma (Gabriel et al., 1989) de la misma área. Esta técnica se llama Interferometría Diferencial o DInSAR.

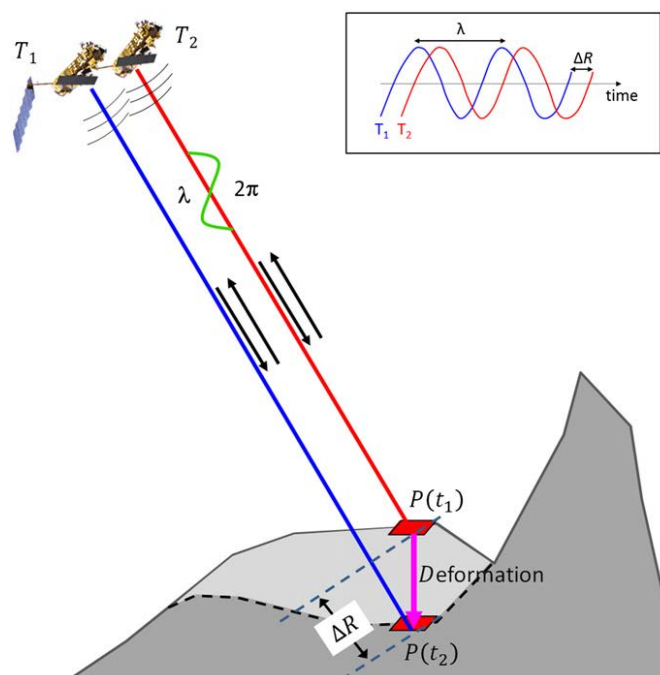


Fig.2. Relación entre el desplazamiento del terreno (ΔR) y la diferencia de fase de la señal.

Siempre que los niveles de ruido son bajos (es decir, los efectos de decorrelación son insignificantes) y la contribución de la fase debida a la topografía local es compensada con precisión, la fase interferométrica puede ser expresada por la ecuación (1).

Desafortunadamente, con DInSAR no es posible eliminar el componente ϕ_{atm} . Así, DInSAR sólo se debe utilizar con el entendimiento de que las medidas de deformación son propensas a errores debido a circunstancias atmosféricas. Sólo puede medir el desplazamiento total entre dos puntos en el tiempo. Por lo tanto, DInSAR no es capaz de distinguir entre movimiento lineal y no lineal.

A pesar de estas limitaciones, en las dos últimas décadas, las técnicas DInSAR han demostrado potencial como herramientas de medición de deformación superficial. Recientemente, su capacidad ha sido considerablemente mejorada mediante el uso de grandes pilas de imágenes SAR adquiridas en la misma área (*Hooper et al., 2012*).

El uso de conjuntos de datos de múltiples imágenes permite identificar fragmentos estables, conocidos como dispersores persistentes o PS, que son puntos en el terreno que devuelven señales consistentemente estables al sensor de radar del satélite. Estos PS permiten medir las velocidades de desplazamiento del terreno con una precisión milimétrica (*Marinkovic et al., 2008; Adam et al., 2009; Peltier et al., 2010; Ferretti et al., 2011*). Los PS típicamente corresponden a objetos sobre estructuras artificiales tales como edificios, puentes, presas, tuberías de agua, antenas, así como a reflectores naturales estables (por ejemplo, rocas descubiertas).

Las técnicas MTI son extensiones de DInSAR convencional a la hora de abordar los problemas causados por la decorrelación y el retraso atmosférico. Estas técnicas implican el procesamiento simultáneo de múltiples adquisiciones de SAR en la misma área para la corrección de los términos de ruido de fase no correlados y, por lo tanto, reducir los errores en las estimaciones de deformación. MTI es el término colectivo usado dentro de la comunidad InSAR para distinguir entre un único interferograma DInSAR y la segunda generación de tecnologías InSAR. El primero de estos métodos en aparecer, en 1999, fue el algoritmo Scatterer Permanente (PSIn-SARTM) (Ferretti *et al.*, 2000, 2001). El interferograma está en el núcleo de todas las tecnologías MTI. El principal motor del desarrollo del MTI fue la necesidad de superar los errores introducidos en los valores de fase por modelos atmosféricos. Estas limitaciones son atajadas mediante el uso del comportamiento que tiene la fase en el tiempo para seleccionar píxeles en los que se minimiza el ruido decorrelado. Entonces la señal de lo que no es deformación se estima mediante una combinación de modelado y filtrado de la serie cronológica. Los algoritmos MTI se dividen en dos grandes categorías, siendo el primero Persistent Scatterer InSAR (PSI) y el segundo, más general, el enfoque Small BASeline. Cada uno de este conjunto de métodos está diseñado para un tipo específico de mecanismo de dispersión (Fig. 3).

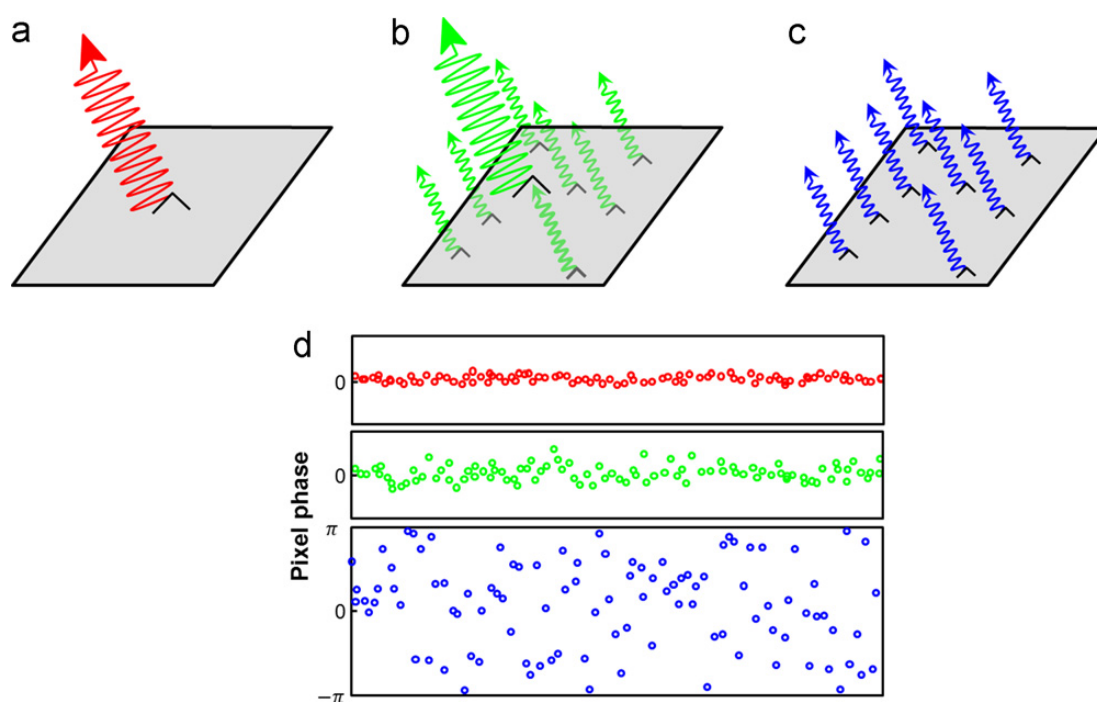


Fig.3. Modelos de mecanismos de dispersión para un elemento de resolución SAR. (a) Dispersor ideal de punto único, (b) dispersor persistente, (c) dispersor distribuido, y (d) simulaciones de fase para 100 iteraciones: (abajo) dispersores distribuidos que se mueven aleatoriamente entre cada iteración, (arriba) PS ideal, y (centro) PS que exhiben variaciones de fase más pequeñas que los píxeles de dispersión distribuida. (Adaptado de Hooper, 2006).



Los algoritmos PS funcionan en una serie temporal de interferogramas formados todos con respecto a una sola imagen “master” SAR. La detección de píxeles que presentan sólo pequeños cambios de reflexión es un paso clave en cada algoritmo PSI y se realiza esencialmente mediante la evaluación de la parte de la fase asociada con el ruido. Con el fin de aislar el ruido de fase, se hacen hipótesis sobre el comportamiento espacio-temporal de todas las demás contribuciones de la fase. Si bien los principios generales se aplican a las contribuciones de fase, la deformación a menudo requiere un modelado específico. En algunos casos se asume un modelo funcional dependiente del tiempo y se asume en la serie temporal de cada PS (*Adam et al., 2003; Crosetto et al., 2003; Ferretti et al., 2001; Kampes, 2005; Lyons y Sandwell, 2003; Werner et al., 2003*).

Alternativamente, se puede suponer que la deformación está correlada espacialmente (*Hooper et al., 2004; van der Kooij et al., 2006*). El filtrado espacial se aplica para estimar los términos espacialmente correlados, incluyendo la deformación, la atmósfera y el error de fase de la órbita, para cada candidato PS. La fase espacialmente correlada se sustrae y la contribución residual del error del DEM en la fase restante se modela para toda la serie temporal, con el residuo entre la fase y el modelo se consigue una estimación del ruido para el píxel.

Para los píxeles que no contienen un dispersor dominante, la variación de fase debida a la decorrelación es a menudo lo suficientemente grande para oscurecer la señal subyacente. Sin embargo, al formar interferogramas solamente entre imágenes separadas por un corto intervalo de tiempo y con una pequeña diferencia en apariencia y ángulo de visión, la decorrelación se minimiza, y para algunos píxeles puede ser suficientemente pequeña para que la señal subyacente sea todavía detectable. Los píxeles en los que la fase filtrada se decorrela en cortos intervalos de tiempo son el objetivo de los métodos SBAS (*Berardino et al., 2002; Schmidt y Burgmann, 2003; Hooper, 2008; Lanari et al., 2004*). Los métodos SBAS pueden alcanzar precisiones similares a las técnicas de PSI, del orden de 1 mm/año (*Lanari et al., 2007*), aunque esto de nuevo depende del número de imágenes, del tiempo de adquisición de las imágenes y de la distancia al punto o área de referencia.

Independientemente del método utilizado, todas las mediciones se realizan en la LOS del satélite y son relativas al punto o área de referencia. Una vez analizados los datos, es posible desarrollar la historia del movimiento a través del área de interés. Esto se logra calculando secuencialmente el desplazamiento relativo entre un objetivo radar individual y el punto de referencia, a lo largo período completo del análisis. Así, la deformación es relativa en el tiempo y el espacio. Una típica serie temporal de movimiento de un solo PS se muestra en la Fig. 3.

Se ha realizado mucha investigación para estudiar la exactitud, los potenciales y las limitaciones de esta técnica con respecto a una gran variedad de aplicaciones (*Colesanti et al., 2003; Crosetto, 2004; Duro et al., 2005; Marinkovic et al., 2008; Adam et al., 2009*).



En este estudio se aplica la técnica Multi-Temporal de Interferometría Radar de Apertura Sintética (MT-InSAR). El procesamiento se realiza mediante el método Stanford (Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal InSAR (StaMPS)) (Hooper *et al.*, 2004) para dispersores persistentes (PS), que combina tanto el método de dispersores persistentes (PSI) como el de pequeñas líneas-base (SB). Estos métodos permiten la identificación de dispersores cuya señal es dominante dentro de la dispersión total de la celda observada en cuestión.

La estructura de StaMPS fue desarrollada inicialmente para aplicaciones PS en terreno natural (Hooper *et al.*, 2004, 2007) y desde entonces, se ha ampliado para incluir análisis de pequeñas líneas-base (SB). El análisis PSI de StaMPS utiliza principalmente la correlación espacial de la fase para identificar píxeles con fase estable a través de la serie temporal, y esto hace que no se asuma ningún modelo aproximado de desplazamientos, al contrario de la correlación temporal. Uno de los requisitos es que los gradientes de desplazamiento en el espacio y el tiempo no deben ser excesivos a la hora de una adecuada desenrollado (unwrapping) de la fase. El método realiza una evaluación de las diferencias en el tiempo de fase interferométricas para así obtener los puntos con potencial para ser seleccionados como dispersores persistentes (PS). Finalmente, la coherencia temporal de los dispersores naturales en imágenes SAR, hace que éstos sean detectados debido al comportamiento de su fase correlacionada a lo largo del tiempo. Finalmente, la técnica estima el desplazamiento de cada punto PS.

Además, el análisis de pequeñas líneas-base (SB), tiene por objeto detectar los píxeles con fase que no sufre una rápida decorrelación durante intervalos de tiempo cortos (pequeña línea-base temporal). Se crean interferogramas en base a las combinaciones de pequeñas líneas-base dadas entre las imágenes disponibles. El objetivo de SB es el de facilitar el desenrollado de fase por medio de la selección de interferogramas con estas pequeñas líneas-base y el filtrado de las fases. Luego, se crea una red de interferogramas para estimar las deformaciones con respecto a una sola imagen master.

Por último, StaMPS / MTI combina los dos conjuntos de resultados (PSI+SB) para mejorar el desenrollado (unwrapping) de fase y el muestreo espacial de la señal de interés.

5.1. Procesado interferométrico a partir de una sola imagen

Para poder ejecutar la metodología StaMPS/MTI de forma adecuada a partir de las imágenes SAR disponibles, éstas se deben de tratar y procesar de forma adecuada previamente. El objetivo de este proceso es el de, a partir de una única imagen maestra (master), ejecutar una serie de pasos sobre las demás imágenes (slaves) para poder



generar los pares interferométricos de toda la serie temporal. Todo este procesado se realiza con el software DORIS como herramienta principal.

5.1.1. Elección de la imagen Master

En primer lugar, para poder llevar a cabo el pre-procesado y la creación de interferogramas (apartados 5.1.2 y 5.1.3), es necesario hacer una conveniente elección de la imagen master. Esto es así porque, con el software DORIS, se hace uso de una única imagen master a partir de la cual se crea cada interferograma junto con cada una de las restantes imágenes de la serie temporal (imágenes slaves).

El criterio fundamental en la elección de esta imagen máster, es el de minimizar las líneas-base temporales (Btemp), espaciales (perpendiculares (Bper)) y centroide Doppler de todos los futuros interferogramas. (*Hooper et al., 2007*).

La imagen de la fecha 27/08/2009 se ha seleccionado finalmente como imagen maestra, procesando un total de 22 interferogramas. Esta imagen maestra minimiza las líneas-base temporales, perpendiculares y centroide Doppler, para unos límites máximos previamente establecidos de 1800 días, 1100 metros y 1380 Hz, respectivamente.

La Fig. 4 muestra las líneas-base temporales y espaciales de los interferogramas conformados por todas las imágenes slaves con la imagen master (27/08/2009) elegida.

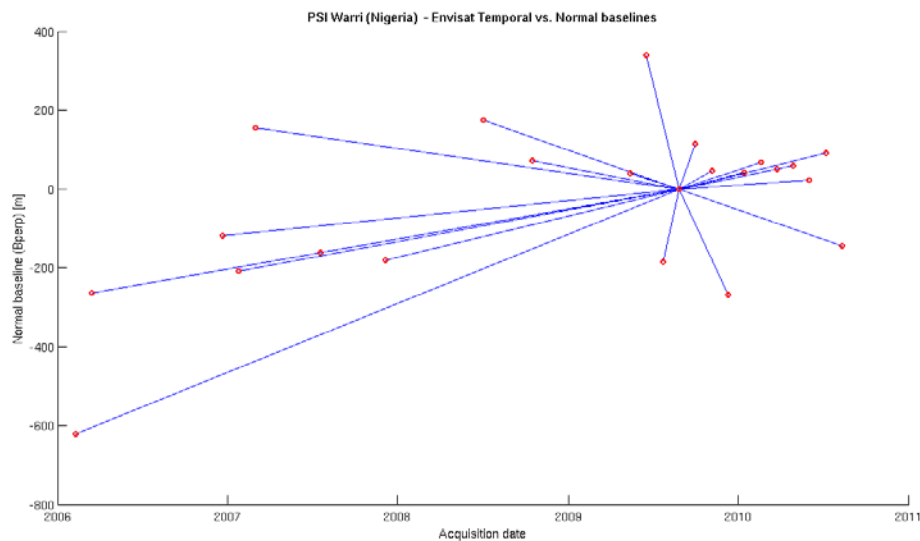


Fig.4. Líneas-base Temporal vs. Perpendicular. Imagen master: 27/08/2009.

5.1.2. Pre-procesado SLC

5.1.2.1. Lectura y recorte (Reading and Cropping)

Como paso previo al procesamiento interferométrico en sí, se tienen que leer las imágenes convenientemente en consecuencia al formato en las que se proporcionan, y extraer de la escena SAR la parte de los datos correspondientes a la zona de estudio.

- **Lectura SLC**

El único propósito de este paso es crear un archivo de resultados *.res* donde se almacenan los parámetros relevantes (PRF, longitud de onda, etc.).

Se leen los datos de los archivos SLC, tanto de la imagen master como de las imágenes slaves, y los parámetros pertinentes se escriben en un archivo de resultados principal para cada una de las imágenes. Estos parámetros se utilizan en los procesos posteriores.

Varias de las líneas del archivo de resultados, son solo información, e incluyen datos tales como la frecuencia centroide Doppler, evaluada a ciertas distancias, las esquinas de las imágenes en latitud y longitud, etc.

Por otra parte, durante este paso, se generan también archivos ligeros (*.ras*) que permiten visualizar las imágenes en visores estándar, de forma que pueda hacerse algún tipo de verificación rápida. La Fig. 5 muestra, a modo de ejemplo, una de las



imágenes de la serie temporal completa, en concreto, la correspondiente a la imagen master. El tamaño de la imagen corresponde a un área aproximada de 100x100 km.



Fig.5. Visualizado del archivo .ras de la imagen master completa (27/08/2009). En rojo, límite aprox. de la zona de estudio.

- **Recorte SLC (Cropping)**

En este paso se lleva a cabo el recorte sobre los datos SLC (en cada una de las imágenes) de la zona de estudio y su posterior escritura en disco en forma de nuevos



archivos SLC. La imagen se lee y rescribe línea por línea, sin que se dé conversión de datos ninguna. Después de esto, los datos SLC se escriben en disco en formato de datos brutos .raw (píxel intercalado, 2x2 byte asignados (short) integer complex).

El recorte de las imágenes slaves siempre es mayor, en líneas y píxeles, que el de la imagen master. El tamaño con el cual se recortó la zona de estudio es de 4100x1200 (líneas x píxeles) para la imagen master, y de 4500x1300 para las imágenes slaves. La Fig. 6 muestra, a modo de ejemplo, una de las imágenes slave y la imagen master recortadas. El recorte se ha limitado a la zona de estudio. En concreto, el área metropolitana de Warri.

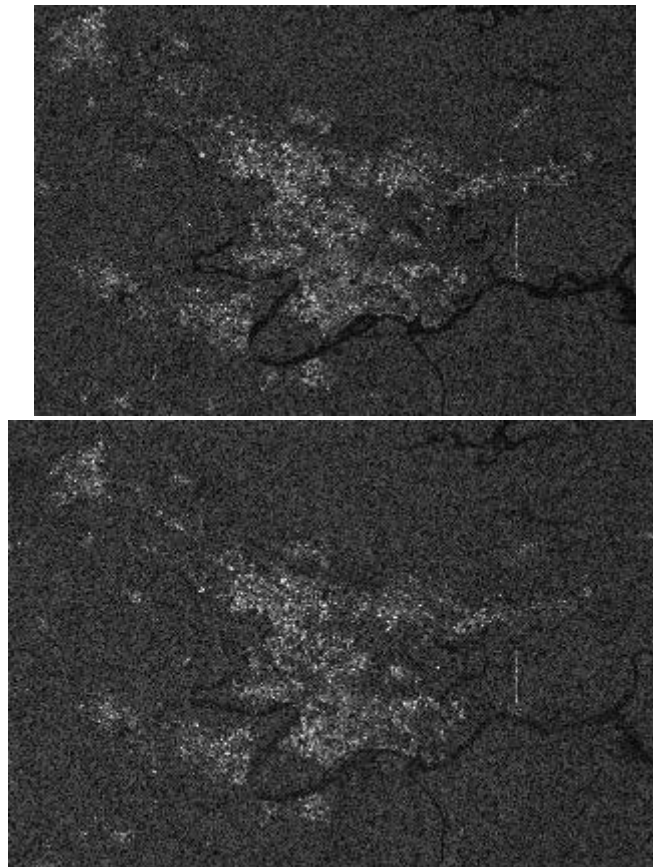


Fig.6. Imáge master recortada (arriba) e imagen slave (19/07/2007) recortada (abajo).

Dado que en este estudio se aplica un método sobre dispersores persistentes (PS), el criterio fundamental a la hora de acotar la zona de recorte, es el de ajustar e incluir una densidad suficiente de este tipo de dispersores. Por tanto, zonas urbanas (edificadas)



en vecindad con la ciudad de Warri, se incluyen dentro del recorte. Por otra parte, se intenta excluir, de la zona de recorte, cuerpos de agua y vegetación, ya que de no ser así, podrían enmascarar los resultados e interferir en la calidad de éstos, ya que corresponden a zonas de baja coherencia.

5.1.3. Creación de Interferogramas (DORIS)

En esta sección se describe el proceso de cálculo de todos los 21 interferogramas con la imagen master común que se ha realizado con el software DORIS

5.1.3.1. Sincronización (Timing)

Este paso calcula el error de sincronización de la imagen máster, que se utiliza para la extracción de la altura de la posición concreta en el DEM y la geocodificación. Una información de sincronización no precisa, puede causar que en la geocodificación se asigne una posición inexacta de los píxeles. La fiabilidad de la estimación del error de sincronización, depende fundamentalmente del DEM.

Por ello, como pasa en este caso en concreto, no es recomendable ejecutar este paso si la topografía de la zona es plana y el DEM no contiene información suficiente para la construcción de alturas en ésta. En consecuencia, este paso se ha omitido y se ha sustituido por una corrección manual del desplazamiento del DEM (ver apartado 6.1.2.4.).

5.1.3.2. Obtención de órbitas precisas

Los algoritmos utilizados en Doris dependen de la información orbital precisa. Por lo tanto, el siguiente paso del proceso es la obtención de las órbitas más precisas disponibles. Las órbitas precisas se extraen de los registros de datos orbitales (archivos ODR) para Envisat. Se ha usado el software Fortran Getorb para la obtención de las orbitas precisas. Este paso es sólo una llamada al sistema para Getorb, que convierte la salida en una tabla de cuatro columnas (segundos del día, X, Y, Z). Los resultados de este paso se escriben en una sección del archivo de resultados .res.

Las efemérides (X, Y, Z) tienen un lapso de tiempo de 6 segundos antes de la primera línea y 6 segundos después de la última línea. El tiempo es, y debe ser, en segundos del día. El intervalo de tiempo es de 1 segundos, por defecto. A tener en cuenta que las coordenadas de las órbitas están en el sistema WGS84.

Para la interpolación se hace uso de splines cúbicos naturales. El grado del ajuste de la curva polinómica es de 5. En este caso, se obtienen un total 30 efemérides orbitales, tanto para la imagen master como para las slaves.



5.1.3.3. Co-registro

Dado que las dos imágenes SAR que conforman el par interferométrico no han sido captadas desde la misma posición (tanto temporal como espacial), éstas han de ser relacionadas entre sí a fin de generar correctamente el interferograma. El co-registro es pues, el procedimiento de correlación que tiene por objetivo encontrar la diferencia o desplazamiento en la geometría de dos imágenes SAR.

- **Co-registro inicial (aproximado):**

El co-registro inicial es el siguiente paso que se realiza del proceso. Sobre la base de los datos orbitales precisos, se utiliza un punto virtual en el centro de la imagen para calcular el cambio en la geometría entre las dos imágenes (master y slave). En este paso, se calcula por tanto el desplazamiento entre master y slave con las órbitas. El co-registro en base a las órbitas de las imágenes slave y máster se calcula con una precisión de unos 30 píxeles (órbitas precisas). Esta es una manera rápida de obtener los offsets (desplazamientos) iniciales.

El desplazamiento se define de tal manera que por un punto P en la imagen master con coordenadas Pm (línea, píxel) y el mismo punto en la imagen slave con coordenadas (en sistema slave) Ps(línea, píxel), se tiene:

$$P_s(l,p) = P_m(l,p) + \text{offset}(l,p)$$

Este proceso crea un archivo *coreg.out* en cada subdirectorio slave, en el que se incluyen los valores de los desplazamientos y demás información del proceso. A continuación se muestran los valores de los desplazamientos extraídos del archivo *coreg.out* de la imagen slave de fecha 16/03/2006:



*_Start_coarse_orbits:

Some info for pixel: 15435, 3141 (not used):

Btemp [days]: -1330 // Temporal baseline
Bperp [m]: -292.6 // Perpendicular baseline
Bpar [m]: -79.8 // Parallel baseline
Bh [m]: -301.9 // Horizontal baseline
Bv [m]: -29.5 // Vertical baseline
B [m]: 303.4 // Baseline (distance between sensors)
alpha [deg]: 185.6 // Baseline orientation
theta [deg]: 20.9 // look angle
inc_angle [deg]: 23.6 // incidence angle
orbitconv [deg]: 0.00610605 // angle between orbits
Height_amb [m]: 32.6 // height = h_amb*phase/2pi (approximately)

Control point master (line,pixel,hei) = (15435, 3141, 0)

Control point slave (line,pixel,hei) = (15346.9, 3151.24, 0)

Estimated translation slave w.r.t. master (slave-master):

Positive offsetL: slave image is to the bottom

Positive offsetP: slave image is to the right

Coarse_orbits_translation_lines: -88

Coarse_orbits_translation_pixels: 10

* End_coarse_orbits:_NORMAL

- **Correlación cruzada (co-registro aproximado):**

Antes de iniciar un co-registro fino, se ha de calcular un co-registro por correlación cruzada con el fin de obtener los desplazamientos aproximados en pocos píxeles, ya que el co-registro fino que implementa Doris requiere que el desplazamiento inicial sea estimado en unos pocos píxeles.



Por tanto, el objetivo de este paso es obtener una mayor precisión de píxel en el desplazamiento entre las dos imágenes, que luego sirve como valor inicial para el proceso de co-registro fino. Mediante la técnica de correlación, el desplazamiento en la dirección del acimut (líneas) y la dirección del rango (píxeles) entre master y slave se calcula con una precisión de alrededor de 1 píxel (para la imagen entera).

La correlación se calcula en el espacio o dominio espectral; se utilizan las imágenes de amplitud. Así, un pequeño número de ventanas relativamente grandes se recortan de master y slave, y se lleva a cabo una correlación cruzada de los parches en amplitud.

El método utilizado en este caso es el “magfft”. La implementación en el dominio de la frecuencia es más o menos la misma que en el dominio espacial. Sólo se utiliza la FFT (transformada rápida de Fourier) para calcular los productos de la correlación (Bähr y Vögtle, 1991) de una manera eficiente, debido a que una convolución en el dominio del espacio corresponde a una multiplicación en el dominio de la frecuencia.

Los valores de los desplazamientos han sido comprobados, no debiendo variar ninguno de ellos en más de un par de píxeles del valor modal de los datos. En caso de que esto no fuese así, se tendría que editar el correspondiente archivo *coreg.out* y corregir estos valores discordantes.

A continuación se muestran los detalles de este paso extraídos del archivo *coreg.out* de la imagen slave de fecha 16/03/2006:



* COARSE_COREGISTRATION: Correlation

Number of correlation windows: 21

window size (l,p): 1024, 256

Number	posL	posP	offsetL	offsetP	correlation
0	13918	2690	-88	10	0.653548
1	13918	3052	-88	10	0.137699
2	13918	3413	-88	11	0.142611
3	14352	2871	-88	10	0.608284
4	14352	3232	-88	10	0.215541
5	14785	2690	-88	10	0.379346
6	14785	3051	-88	10	0.694563
7	14785	3413	-88	11	0.473052
8	15219	2870	-88	10	0.684462
9	15219	3232	-88	10	0.616762
10	15219	3593	-88	11	0.360651
11	15652	3051	-88	10	0.661501
12	15652	3413	-88	11	0.555484
13	16086	2870	-88	10	0.653686
14	16086	3232	-88	10	0.593104
15	16086	3593	-88	11	0.468521
16	16519	3051	-88	10	0.629652
17	16519	3412	-88	11	0.503373
18	16953	2870	-88	10	0.611762
19	16953	3231	-88	10	0.458172
20	16953	3593	-88	11	0.153247

Estimated total offset (l,p): -88, 10

Coherence -999 values are disregarded in the analysis.



Claramente, los desplazamientos estimados parecen consistentes para cada una de las ventanas, y el desplazamiento “total” probablemente sea una buena aproximación inicial para llevar a cabo el siguiente paso de co-registro fino.

- **Co-registro fino:**

En este paso se calculan los vectores de desplazamiento para conseguir alinear la imagen slave con la master, con una precisión a nivel sub-píxel para una serie de lugares en la master.

Durante este proceso de co-registro fino, se distribuyen sobre las imágenes un gran número de pequeñas ventanas, y se realiza una correlación cruzada en amplitud para estimar los vectores de desplazamiento en esas posiciones a nivel de píxel. A continuación, estas correlaciones son sobre-muestreadas armónicamente (interpoladas, requiere FFT) para encontrar el máximo desplazamiento a nivel sub-píxel.

El factor de sobre-muestreo es un parámetro importante, y en este caso tiene un valor de 32. No es necesario un gran número de ventanas para una zona con coherencia alta y línea base temporal pequeña. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, a menudo es conveniente utilizar un gran número de ventanas, como se ha hecho en este caso en concreto con 3600 ventanas de .

Para la correlación cruzada en este paso de co-registro fino, se ha usado el mismo método, “magfft”, usado en el apartado anterior.

- **Cálculo de parámetros del co-registro. Ajuste del polinomio:**

En esta parte del proceso, se lleva a cabo el cálculo del modelo de transformación real (polinomio 2D) para la alineación de la imagen slave con la master. Véase también (Samson, 1996).

En base a la estimación de los vectores de desplazamiento finos entre master y slave, que se describen en la sección anterior, estos vectores se modelan mediante un polinomio 2D de cierto grado. Para la mayoría de los tipos de terreno, un polinomio de segundo grado puede modelar adecuadamente la distorsión de la imagen slave con respecto a la imagen master.

Durante este paso, el polinomio se ajusta en rango y acimut por mínimos cuadrados a partir de los vectores de desplazamiento observados. Los vectores estimados con una coherencia por debajo de 0.3, son descartados.



La solución por mínimos cuadrados que se utiliza, es la solución Cholesky por descomposición de la matriz normal. Algunos datos pueden ser excluidos a priori mediante el establecimiento de un valor umbral para la correlación. Los datos también pueden ser excluidos mediante la edición del archivo de resultados, disminuyendo así de manera artificial la correlación para una determinada ventana de desplazamiento.

A continuación se muestra el registro de los datos (en archivo de resultados) para este paso del proceso del par interferométrico con imagen slave de fecha 16/03/2006:



*_Start_comp_coregpm:

Degree_cpm: 2

Estimated_coefficientsL:

-8.7776360e+01 0 0

-8.4154716e-02 1 0

-5.9470776e-01 0 1

3.6897177e-01 2 0

-1.1077469e-01 1 1

-5.5934990e-02 0 2

Estimated_coefficientsP:

9.8409217e+00 0 0

1.9251379e-01 1 0

1.1170622e+00 0 1

-6.4744473e-03 2 0

-9.8805568e-02 1 1

-1.1623398e-01 0 2

Deltaline_slave00_poly: 8.7765529e+01

Deltapixel_slave00_poly: -9.8200537e+00

Deltaline_slave0N_poly: 8.8361979e+01

Deltapixel_slave0N_poly: -1.0764463e+01

Deltaline_slaveN0_poly: 8.7698640e+01

Deltapixel_slaveN0_poly: -9.9340475e+00

Deltaline_slaveNN_poly: 8.8356768e+01

Deltapixel_slaveNN_poly: -1.0823393e+01

*_End_comp_coregpm:_NORMAL



En el archivo de registro del proceso (.log), se incluye información estadística adicional, como la desviación estándar de las estimaciones y los residuos después del ajuste por mínimos cuadrados.

5.1.3.4. Corrección manual del desplazamiento del DEM

Este paso sólo es necesario si ha fallado la ejecución de la fase de sincronización (timing) de la imagen master, el cual es el caso que nos ocupa, debido a que el terreno es muy llano.

En primer lugar, se elige una imagen slave cercana en el tiempo y en el espacio (líneas-base temporal y perpendicular pequeñas), que en este caso es la imagen de fecha 01/10/2009. En el directorio de esta imagen, se ejecutan los siguientes procesos:

- 1) Ajuste del polinomio del co-registro. Se vuelve a ejecutar este paso (apartado 5.1.3.3) haciendo uso solamente de la imagen slave elegida.
- 2) Cálculo de la fase de referencia del DEM que se restará posteriormente al interferograma. Para más detalle ver apartado 5.1.3.5.
- 3) Re-muestreo de la imagen slave de acuerdo con el modelo de transformación del co-registro. Para más detalle ver apartado 5.1.3.6.
- 4) Cálculo del interferograma complejo. Para más detalle ver apartado 5.1.3.7.

Después, haciendo uso del software Matlab, se compensa el desplazamiento estimado de la pendiente del DEM a partir de la amplitud del interferograma. La Fig. 7 muestra el resultado que mejor se ajusta. Haciendo zoom sobre unos pocos lugares, se ha verificado que el desplazamiento es razonable. De no haber sido así, se deberían haber ajustado los desplazamientos en rango y acimut hasta encontrar un mejor resultado. Una vez satisfecho con el ajuste, se actualizan los valores resultantes de los errores (en rango y acimut) de sincronización de la imagen master; que serán necesarios para calcular la fase de referencia (apartado 5.1.3.5) del DEM y la geocodificación (apartado 5.1.3.8).

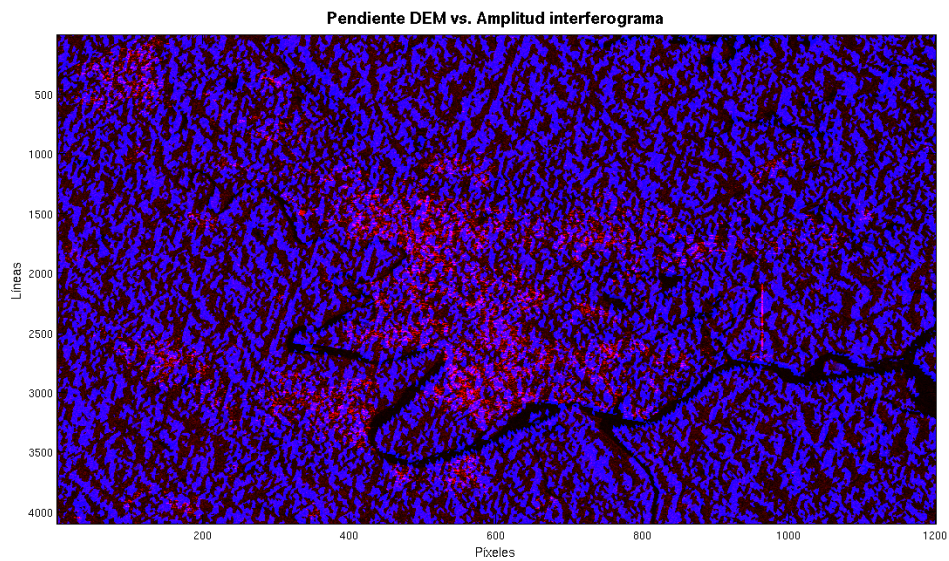


Fig.7. Pendiente DEM (en color azul) vs. Amplitud interferograma (en rojo).

5.1.3.5. Cálculo de la fase de referencia del DEM

El objetivo de este paso es calcular la fase de referencia del DEM (fase topográfica residual debida al error del DEM), que se restará del interferograma posteriormente.

Para llevar a cabo este proceso es necesario el DEM completo. Este DEM debe estar en el sistema de referencia WGS84 (igual que las efemérides de órbita), y sobre un grid equiangular.

La fase de referencia del DEM, se calcula en dos pasos:

- 1) En primer lugar, el DEM se codifica al sistema de coordenadas de la imagen master.
- 2) Después, la fase de referencia se interpola al grid completo de coordenadas master. Se utiliza para ello una interpolación lineal en base a una triangulación de Delaunay, de la que se encarga el software Triangle.

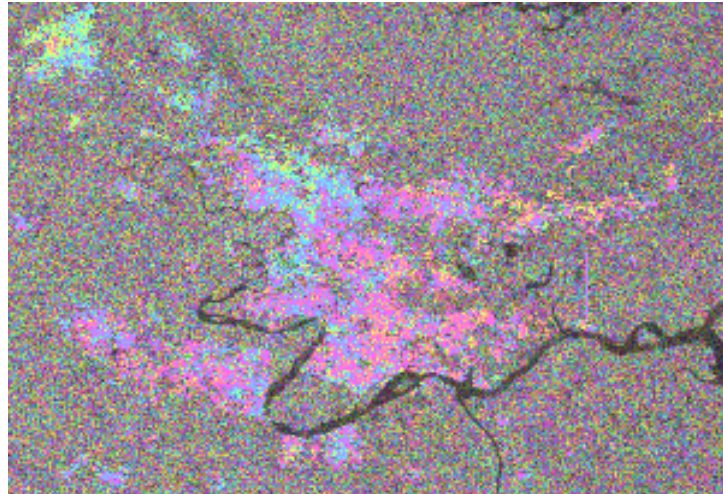


Fig.8. Fase de referencia del DEM. Imagen 16/03/2006.

5.1.3.6. Re-muestreo de la imagen slave

En este paso, se vuelve a muestrear la imagen slave sobre el grid de la imagen master. Este re-muestreo (Fig. 9) se lleva a cabo de acuerdo con el modelo de transformación de la fase de co-registro. Este modelo se establece con precisión sub-píxel qué puntos de la imagen slave corresponden a los del grid de la imagen master. La interpolación es independiente de la dirección del rango y del acimut. Para todos los puntos de la superposición entre slave y master, se evalúa el polinomio del co-registro.

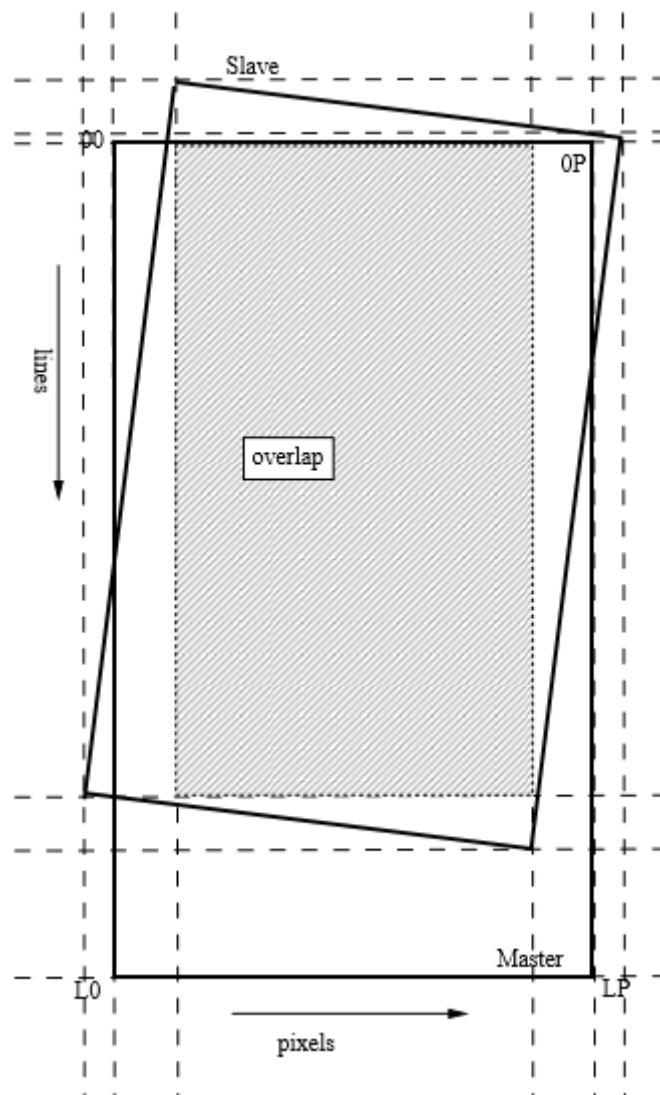


Fig.9. Re-muestreo. Superposición entre imagen master e imagen slave.



5.1.3.7. Creación del interferograma

Los pasos englobados dentro de este apartado, están destinados a obtener la componente de la fase interferométrica que genera el desplazamiento de un determinado píxel en la dirección de visión del satélite (Line Of Sight (LOS)). Para ello, es necesario sustraer aquellas componentes de fase debidas a la topografía del lugar y al elipsoide de referencia.

- **Cálculo del interferograma complejo:**

El objetivo de este paso es calcular el interferograma complejo. Se calcula como el producto conjugado complejo de las dos imágenes complejas (slave y master). La fase de este interferograma complejo comprende todas sus componentes.

- **Cálculo de la fase de referencia (“Tierra plana”):**

Este paso puede llevarse a cabo tan pronto como se conocen las órbitas precisas. Aunque el enfoque recomendado consiste en calcular esto sólo después del cálculo del interferograma.

El objetivo de este proceso es calcular la corrección por “Tierra plana”, es decir, la componente (contribución) de la fase causada por la superficie de referencia (elipsoide WGS84).

Para un determinado punto (línea, píxel) en la imagen master, se calculan las coordenadas correspondientes (X, Y, Z) del satélite master y slave y el punto en el elipsoide de referencia. Entonces, a partir de esto, se calcula la línea-base paralela y la fase.

La fase de referencia se calcula en una serie de puntos distribuidos sobre la imagen total, después de lo cual se estima un polinomio 2D (por mínimos cuadrados) ajustando así estas “observaciones” (Fig. 10).

Normalmente, un polinomio de grado 5 es suficiente para modelar la fase de referencia para una escena completa. Se podría seleccionar un grado menor para imágenes más pequeñas, como ha sido este caso (grado 3), lo que también debe aumentar la estabilidad de la matriz normal.

Véase también *Schwäbisch (1995)* o *Geudtner y Schwäbisch (1996)*.

A continuación se muestran los valores de los coeficientes del polinomio para la imagen slave de fecha 16/03/2006:



* _Start_comp_refphase:

Degree_flat: 3

Estimated_coefficients_flatearth:

1.69923270e+04	0 0
3.13287883e+02	1 0
1.83365636e+03	0 1
-2.76074581e-01	2 0
1.92953540e+01	1 1
-1.00349394e+02	0 2
-3.88707942e-03	3 0
3.68064572e-03	2 1
-1.03496038e+00	1 2
6.95881602e+00	0 3

Degree_h2ph: 3

Estimated_coefficients_h2ph:

-8.94044124e-04	0 0
-9.16488963e-06	1 0
8.47493950e-05	0 1
1.01649063e-09	2 0
9.77093121e-07	1 1
-1.04597234e-05	0 2
6.91886590e-11	3 0
2.54273070e-09	2 1
-1.05867966e-07	1 2
1.17769794e-06	0 3

* End_comp_refphase:_NORMAL

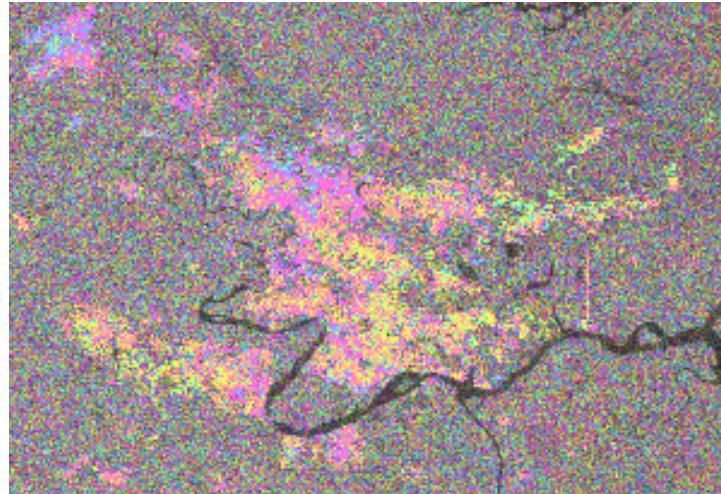


Fig.10. Fase de referencia del elipsoide para imagen slave de 16/03/2006.

- **Sustracción de la fase de referencia (“Tierra plana”):**

Una vez calculada la fase interferométrica de referencia en el apartado anterior, ésta se puede sustraer del interferograma complejo calculado en el apartado 5.1.3.7. Por tanto, en este paso, la componente fase de referencia generada por una superficie matemática (elipsoide) se resta de la fase del interferograma complejo. Esto se hace mediante una multiplicación compleja con el conjugado, que escrito simbólicamente:

$$I = I \cdot (\cos(R\phi) - i \sin(R\phi))$$

Donde I es el interferograma complejo y $R\phi$ es la fase de referencia para un cierto punto.

- **Sustracción de la fase de referencia del DEM:**

En este paso, la fase de referencia del modelo digital de elevaciones (DEM) se resta del interferograma complejo. Es decir, se sustrae la componente de la fase debida a la topografía de la zona de estudio. Esto se hace mediante la multiplicación compleja con el conjugado, tal como se hace con la sustracción de la fase de referencia.

5.1.3.8. Geocodificación

Se necesitan coordenadas geocodificadas en el procesamiento de Persistent Scatterers (PS) posterior, por lo que en este paso, a partir de las alturas (DEM), se convierten los



píxeles (sistema de coordenadas radar) en coordenadas geocodificadas, es decir, en un sistema de referencia fijo en Tierra conocido. Como resultado de este proceso se obtienen la latitud y longitud (WGS84) de cada píxel.

5.2. Procesado PSI

El procesamiento PSI se lleva a cabo sobre los inteferogramas (22) generados previamente a partir de la imagen master de 27/08/2009 y cada una de las imágenes slaves (Fig. 11).

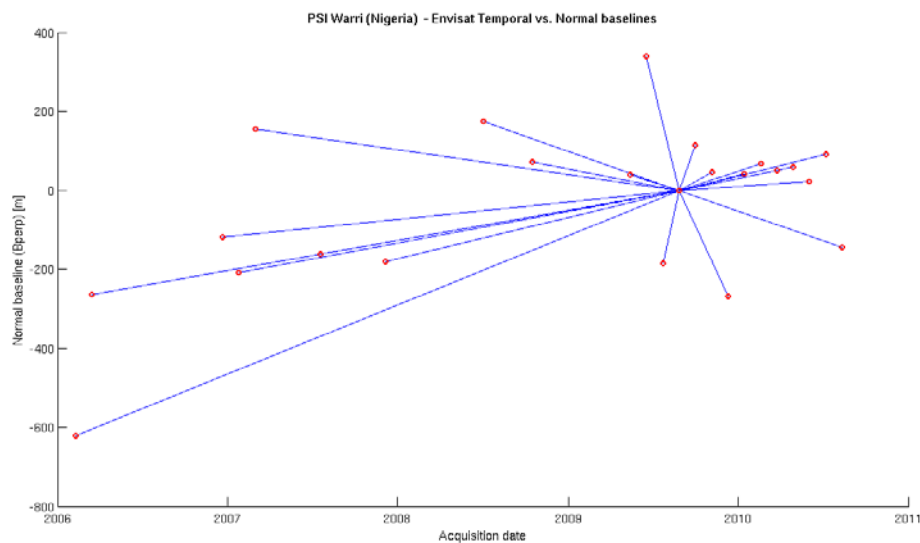


Fig.11. PSI. Líneas-base Temporal vs. Perpendicular.

Los archivos necesarios para el procesado PS se crean en base a una serie de parámetros establecidos previamente, siendo de especial interés la dispersión en amplitud, que se establece en valor de 0.4.

Los parámetros que intervienen en todo el procesado PS, deben de ser establecidos y cargados antes de iniciar cada una de las partes del proceso.

5.2.1. Cargar datos

En este paso se convierte los datos a los formatos requeridos para el procesamiento PSI y los almacena en los espacios de trabajo de Matlab.



5.2.2. Estimación del ruido de fase

Se trata de un paso iterativo que se encarga de estimar el valor del ruido de fase para cada píxel candidato (PS) en cada interferograma (véase *Hooper et al., 2007*).

5.2.3. Selección de PS

Los píxeles son seleccionados en base a sus características de ruido. Este paso, también estima el porcentaje de píxeles aleatorios (no PS) en una escena a partir del cual se puede obtener la densidad por km^2 .

5.2.4. Criba de PS

Los píxeles seleccionados en el paso anterior son cribados, eliminando así los que se consideran demasiado ruidosos y aquellos que se deben a la contribución de la señal de elementos vecinos. Finalmente, se obtuvieron un total de 17790 píxeles con fase estable, catalogados así como dispersores persistentes.

5.2.5. Corrección de fase

La fase envuelta de los píxeles seleccionados se corrige por error del “look-angle” (DEM) no correlacionado espacialmente.

Después de ejecutar este paso, se verifica la fase envuelta de los píxeles seleccionados (Fig. 12). Si parece que están siendo seleccionados demasiados píxeles ruidosos, el valor del parámetro que marca el umbral de desviación estándar se puede reducir. En caso contrario, si son seleccionados pocos píxeles, este parámetro puede aumentarse. Si se da el caso de un notable submuestreo en la selección de píxeles, el número de candidatos iniciales puede aumentarse mediante el establecimiento de una mayor sensibilidad de la dispersión (parámetros iniciales).

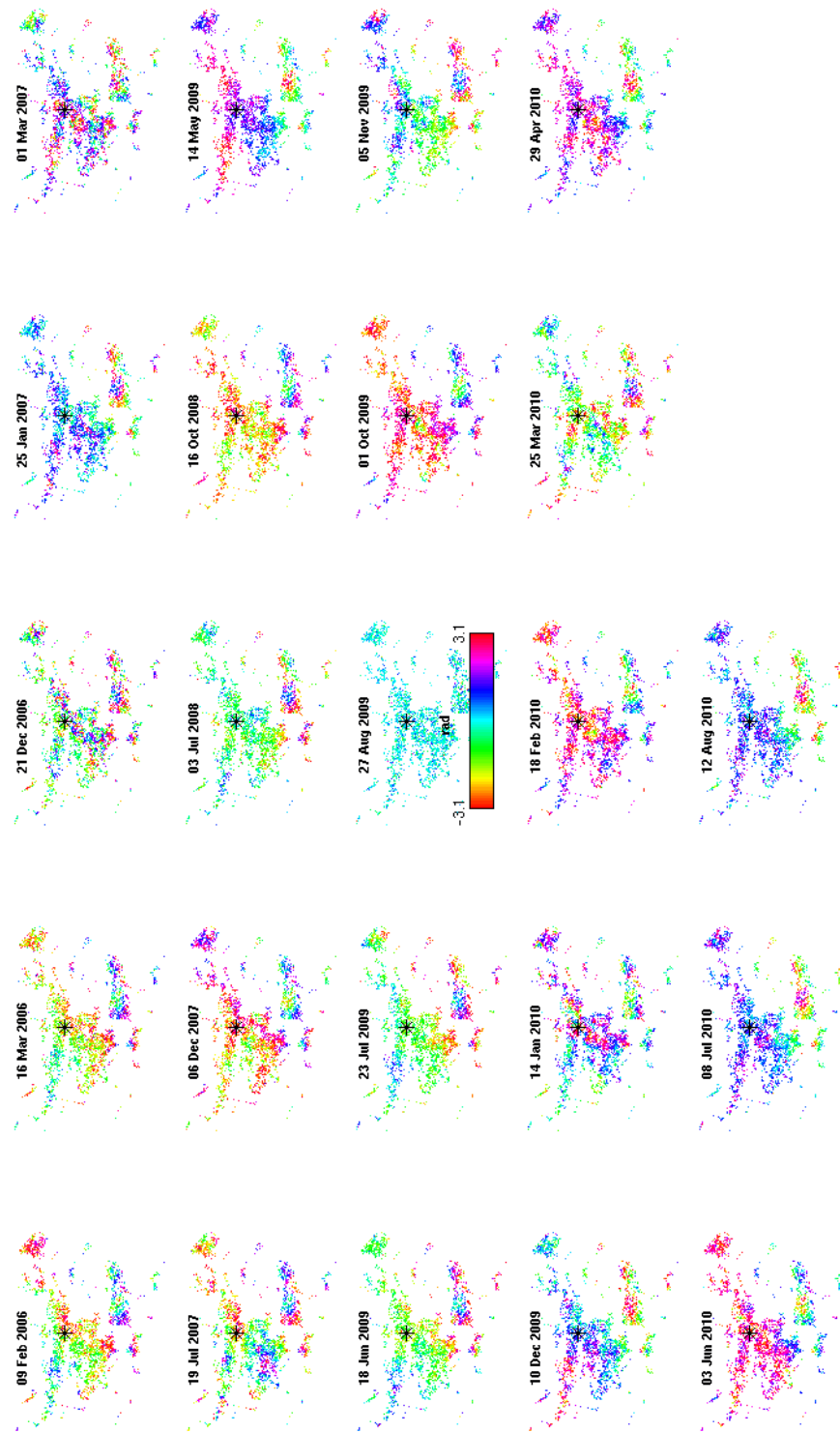


Fig.12. Fase (radianes) sin desenrollar de todos los interferogramas PSI iniciales.



5.2.6. Desenrollado de fase (unwrapping)

Este paso es quizás el más importante, ya que se encarga del desenrollado de la fase.

Este proceso no se encuentra implementado en el software Doris, por lo que para obtener el interferograma desenrollado, se ha utilizado el software Snaphu.

El “unwrapping” de fase en dos dimensiones es el proceso de recuperación de datos de fase sin ambigüedades a partir de una matriz 2D de valores de fase conocido sólo módulo 2π (rad). Snaphu implementa los algoritmos Statistical-cost y Network-flow para desenrollar la fase propuestos por Chen y Zebker (*Chen y Zebker, 2000, 2001, 2002*). Este algoritmo plantea desenrollar la fase como un problema de estimación de probabilidad máxima a posteriori, que tiene como objetivo calcular la solución desenrollada más probable a partir de los observables de entrada. Debido a que las estadísticas relativas a los datos de entrada de la solución dependen de la cantidad medida, Snaphu incorpora tres modelos estadísticos, uno para datos topográficos, otro para datos de deformación, y un tercero para datos genéricos de suavizado.

Se ha verificado la fase desenrollada (Fig. 13), comprobando e identificando los errores en el “unwrapping”, es decir, saltos de fase bruscos en el espacio que no se correlacionan en el tiempo. Estos errores son más probables en interferogramas con líneas-base perpendiculares más largas; por dos razones, en primer lugar porque hay más ruido asociado con cada píxel PS, y en segundo lugar, porque la fase debida a cualquier error “look-angle” espacialmente correlado (SCLA) es mayor, ya que es proporcional a la línea-base perpendicular.

El ruido se reduce por filtrado espacial antes de desenrollar la fase, pero también es posible, volviendo a ejecutar el paso 5.2.7 (estimación del error SCLA, ver más adelante), para reducir la fase de error SCLA mediante la estimación de este error SCLA de los interferogramas que han sido desenrollados correctamente. Si se vuelve a ejecutar el paso de “unwrapping” después del paso 5.2.7, se sustrae temporalmente el error SCLA de la fase enrollada antes de desenrollarla. La precisión en el “unwrapping” se mejora aún más restando también temporalmente la fase (contribución) de la atmósfera y del error orbital (AOE) de la imagen master, presente en todos los interferogramas, que también se estima en el paso 5.2.7.

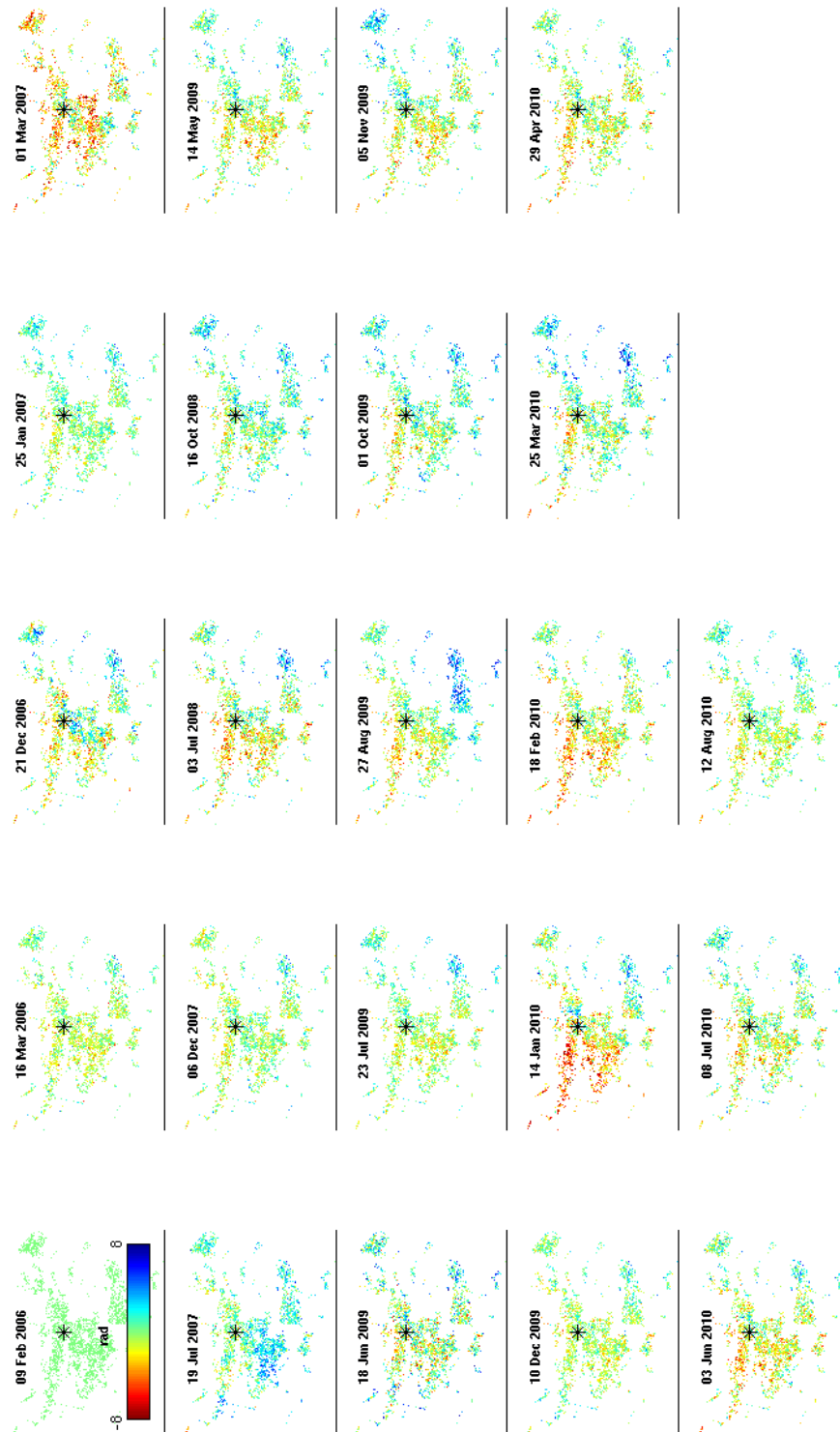


Fig.13. Fase (radianes) desenrollada (unwrapping) de los interferogramas PSI iniciales.



5.2.7. Estimación del error de “look-angle” espacialmente correlado

En este paso, se calcula el error de “look-angle” espacialmente correlacionado (SCLA). Este error es debido casi exclusivamente al error correlado espacialmente del DEM (incluye el error en el mismo DEM y la incorrecta asignación de coordenadas radar de éste). En la Fig. 14 se muestra el error SCLA en unidades de fase por metro de línea-base perpendicular (radianes/metro), teniendo en cuenta que 0.01 rad/m corresponden a unos 12 m de error de DEM para Envisat.

También en este paso, se calculan la fase de la atmósfera de la imagen master y el error orbital (master AOE) (Fig. 15) de forma simultánea. La componente atmosférica de las imágenes slaves, junto con el error orbital (slave AOE), se representan en la Fig. 16.

En la Fig. 17 se representa la componente orbital de la fase para cada uno de los interferogramas PSI.

Es posible restar de la fase total las componentes anteriores que no se deben a una posible deformación de terreno, pudiendo apreciar (Fig. 18) de forma aislada la componente de la fase debida al desplazamiento.

Después de ejecutar este paso, se comprueba que las estimaciones parecen razonables, es decir, la fase desenrollada menos las estimaciones SCLA y AOE (Fig. 19) se observa más “suave” que solamente la fase desenrollada (Fig. 13). Si, por lo general, no es más “suave”, probablemente uno o más interferogramas han sido desenrollados incorrectamente. En este caso se identifica los interferogramas que no han sido desenrollados correctamente, sustrayéndolos para volver a ejecutar el paso 5.2.7 de nuevo sin incluir sus contribuciones.

Una vez satisfechos con el resultado, se vuelve a ejecutar el paso de “unwrapping”. Esto restará las estimaciones SCLA y AOE antes de desenrollar la fase.

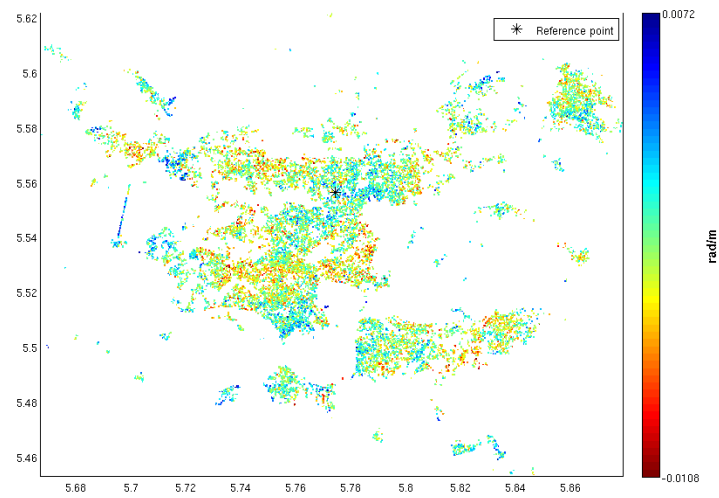


Fig.14. PSI Error (rad/m) SCLA o error DEM finalmente estimado.

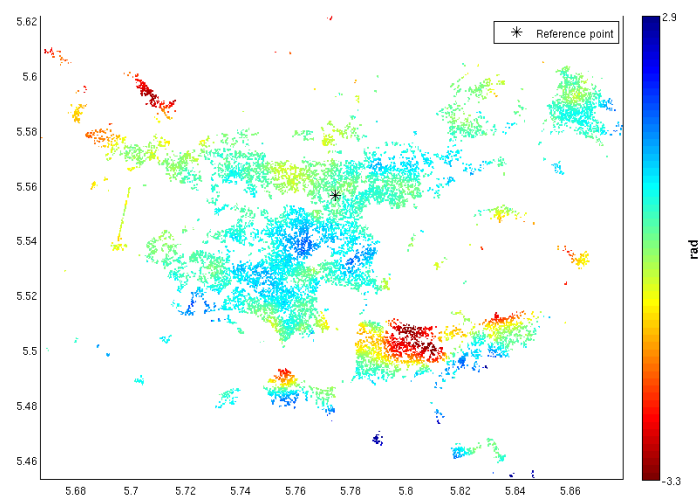


Fig.15. PSI. Componente atmosférica de la imagen master y error orbital (master AOE).

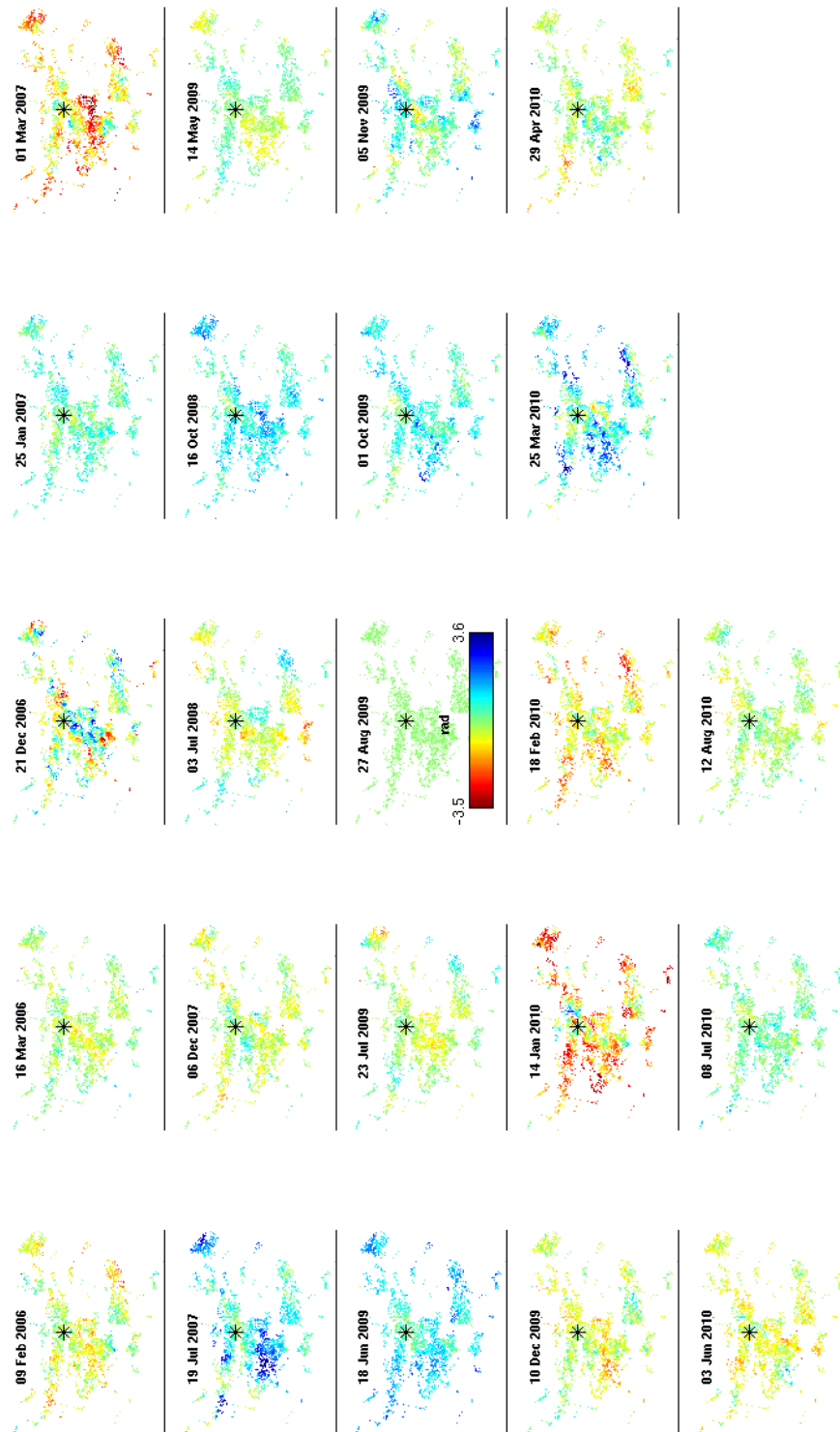


Fig.16. PSI. Componente atmosférica de la imagen slave y error orbital (slave AOE).

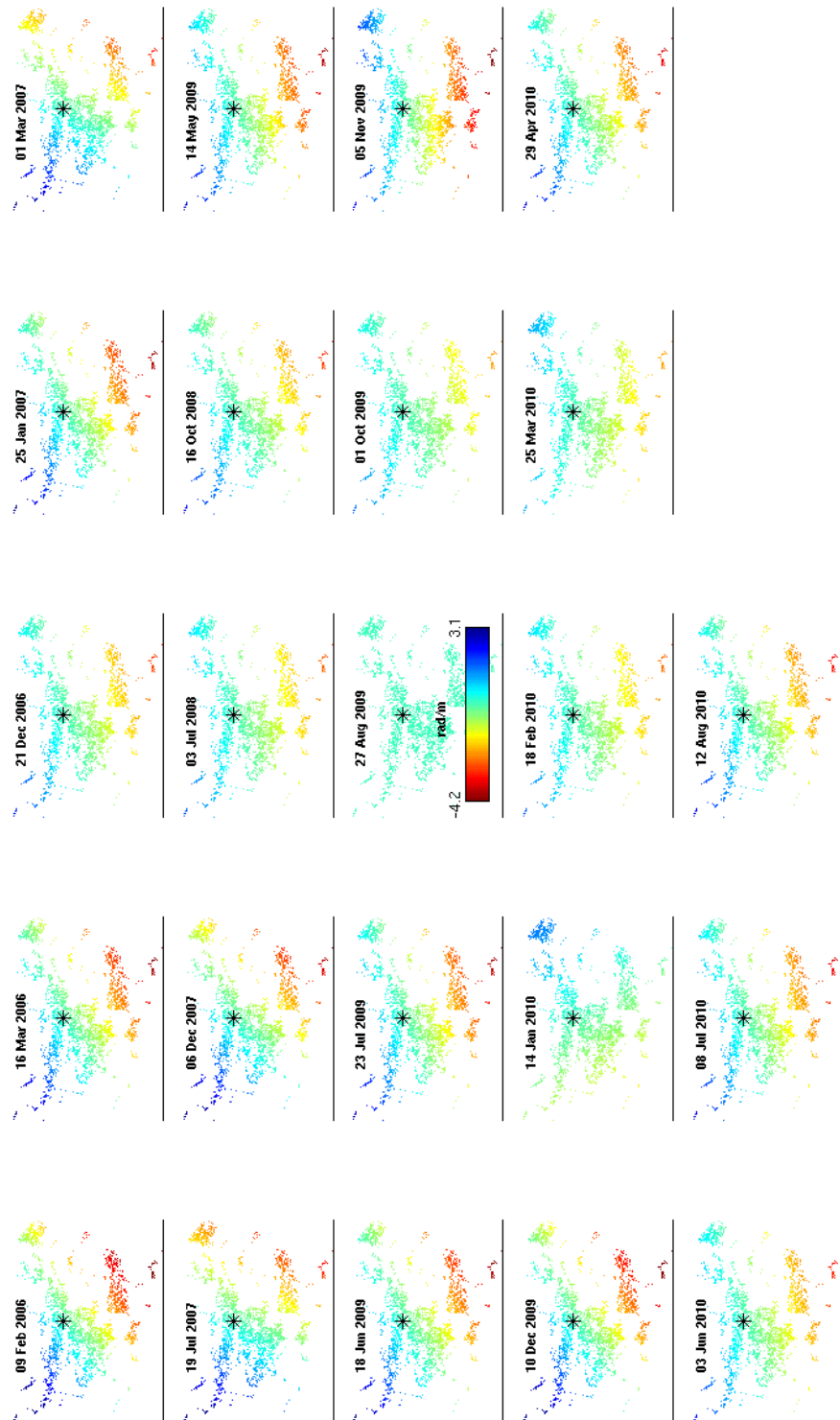


Fig.17. Rampas orbitales para cada una de los interferogramas PSI iniciales.

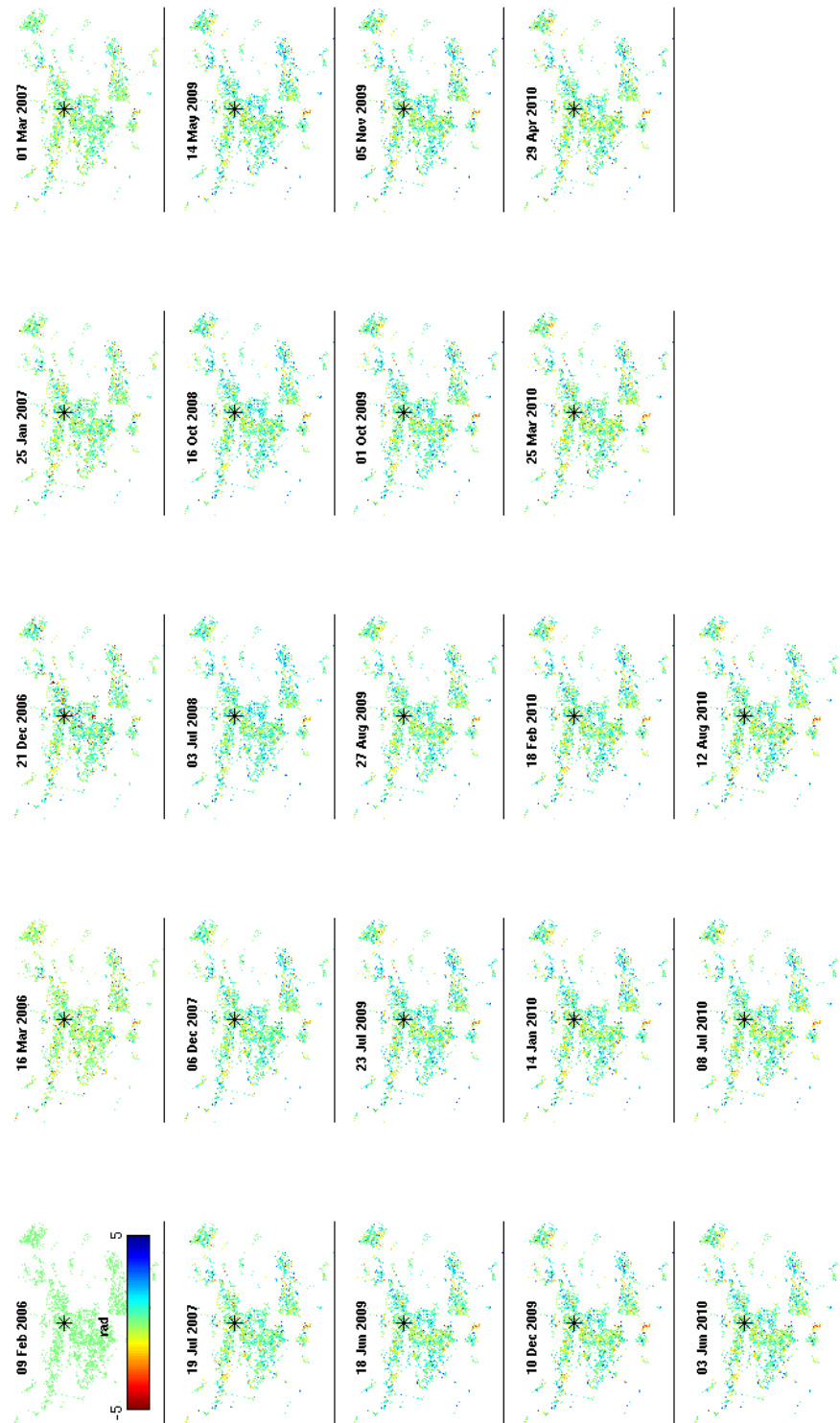


Fig.18. PSI. Fase desenrollada (rad) menos SCLA, master AOE, órbitas y slave AOE.

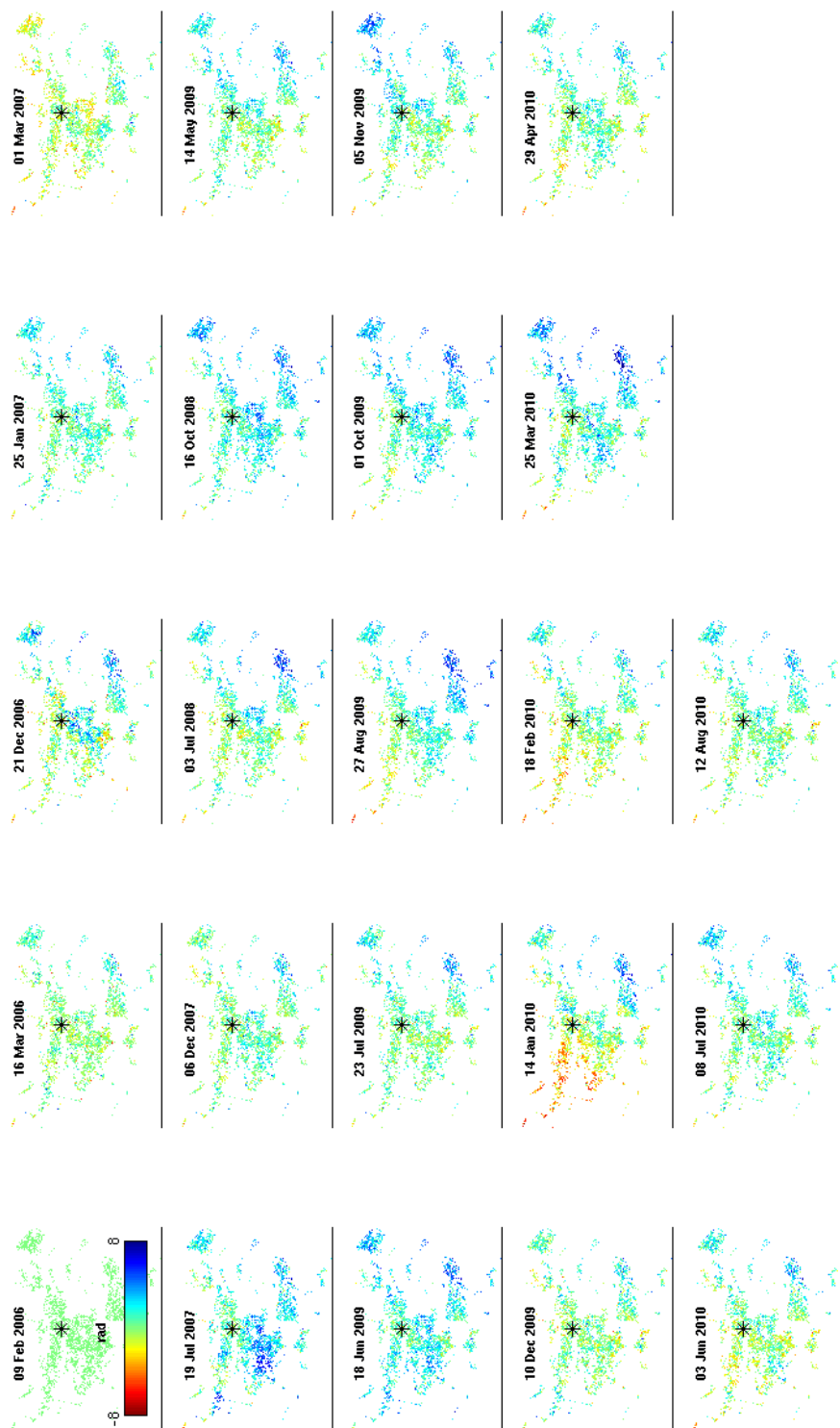


Fig.19. PSI. Fase desenvuelta (rad) menos SCLA y master AOE.



Finalmente, después de realizar las verificaciones necesarias, se representa la velocidad media (Fig. 20) en dirección de la LOS (mm/año) para cada punto PS, junto con su correspondiente valor de desviación estándar (Fig. 21), con el fin de poder analizar a posteriori el tipo y magnitud de las deformaciones durante todo el periodo (2006-2010) de la serie temporal. Esta velocidad se calcula en base a una zona de referencia que se considera estable según estudios geológicos/geotécnicos de la zona (Mahmud *et al.*, 2006).

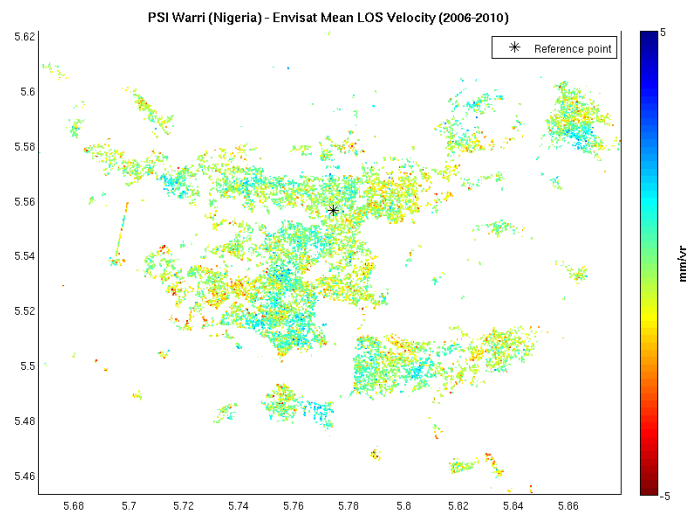


Fig.20. PSI. Velocidad media (mm/año) en la dirección LOS. Periodo 2006-2010. Zona de referencia, asterisco.

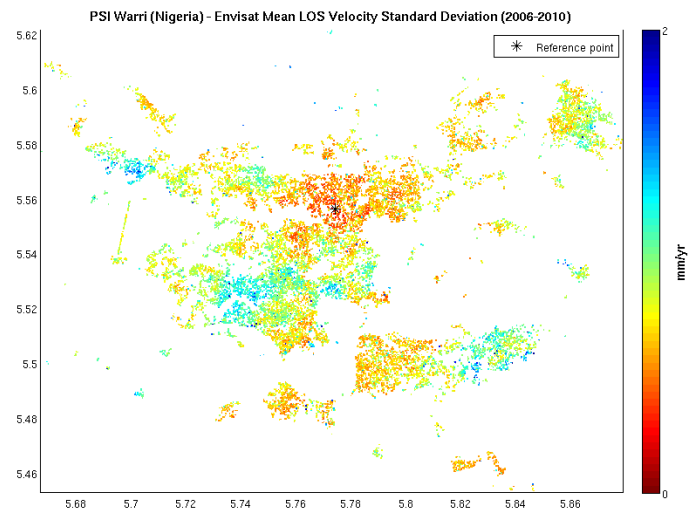


Fig. 18. PSI. Desviación estándar (mm/año) de la velocidad media en la dirección LOS. Periodo 2006-2010. Zona de referencia, asterisco.



5.3. Procesado Small Baseline (SB)

El número total de interferogramas generados para realizar las estimaciones necesarias y el filtrado de fase, es de 132. Se obtuvieron un total de 70189 píxeles con fase estable, catalogados así como dispersores persistentes (SB).

Los pasos que sigue el procesado para SB son los mismos que para el método PSI. El paso de “unwrapping” (5.2.6.) incluye un procesamiento extra adicional, después de que la fase ha sido desenrollada, para recuperar la fase con respecto a la imagen master original a partir de una inversión por mínimos cuadrados. Adicionalmente, en el procesado SB, también se incluye el cálculo del error SCLA tanto para pequeñas líneas-base como para una única imagen master. La Fig. 21 muestra la fase desenvuelta para los interferogramas finalmente incluidos en los resultados del procesado SB.

Los residuos entre la fase desenrollada para SB y la predicha a partir de los valores del modelo para una única imagen master, han de ser inspeccionados visualmente junto con la fase envuelta y desenvuelta para cada uno. Los residuos aislados dentro del rango de entre $-\pi$ y π (rad) de magnitud serán válidos, pero los residuos correlados espacialmente fuera de estos valores indican problemas en el “unwrapping” en uno o más interferogramas. Cuando se da esto último, se identifican qué interferograma/s son desenrollados de forma incorrecta, ya que un solo interferograma mal desenrollado puede causar residuos propagados en muchos interferogramas.

Una vez realizada la inspección visual de los residuos tras un largo proceso iterativo manual, se descartan 24 interferogramas (nº 2, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 30, 39, 51, 61, 71, 81, 90, 98, 105, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118), quedando así 108 interferogramas de un total de 132 iniciales. A continuación se vuelve a repetir el proceso de “unwrapping” con el nuevo conjunto reducido de interferogramas “válidos”. En la Fig. 22. se pueden observar como mayoritariamente los residuos se encuentra entre los valores $-\pi$ y π .

Una vez que ya no hay más residuos correlados espacialmente, se comprueba la fase desenrollada de cada uno de los interferogramas (Fig. 21).

En la Fig. 23 se representan la fase desenrollada para los interferogramas iniciales a partir de una única imagen máster y referenciada a la primera imagen (09/02/2006) de la serie temporal.

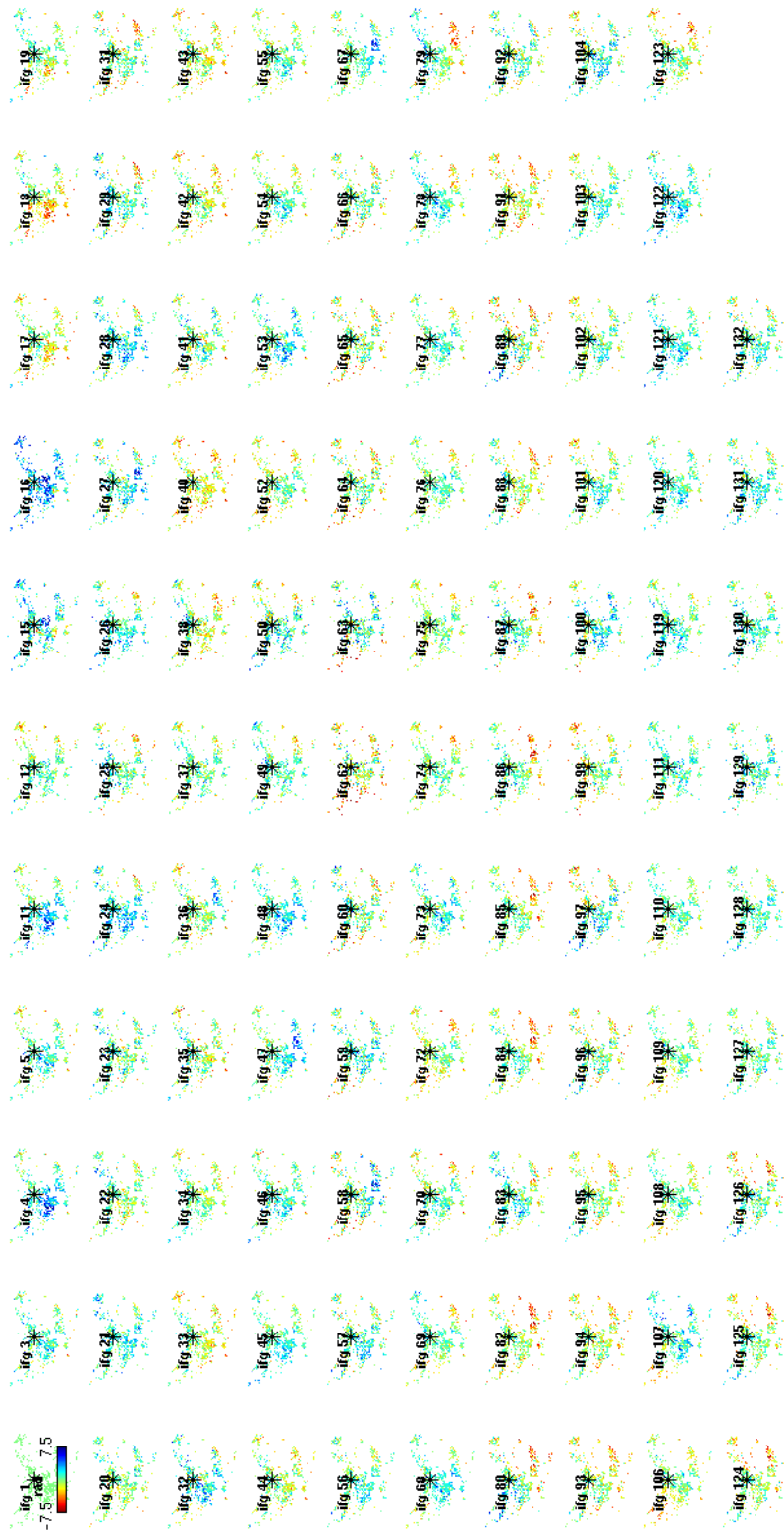


Fig.21. Fase “unwrapping” (rad) de los interferogramas finalmente seleccionados para SB.



Fig.22. Residuos (rad) entre la fase desenvuelta para SB y la predicha a partir de los valores del modelo para una única imagen master.

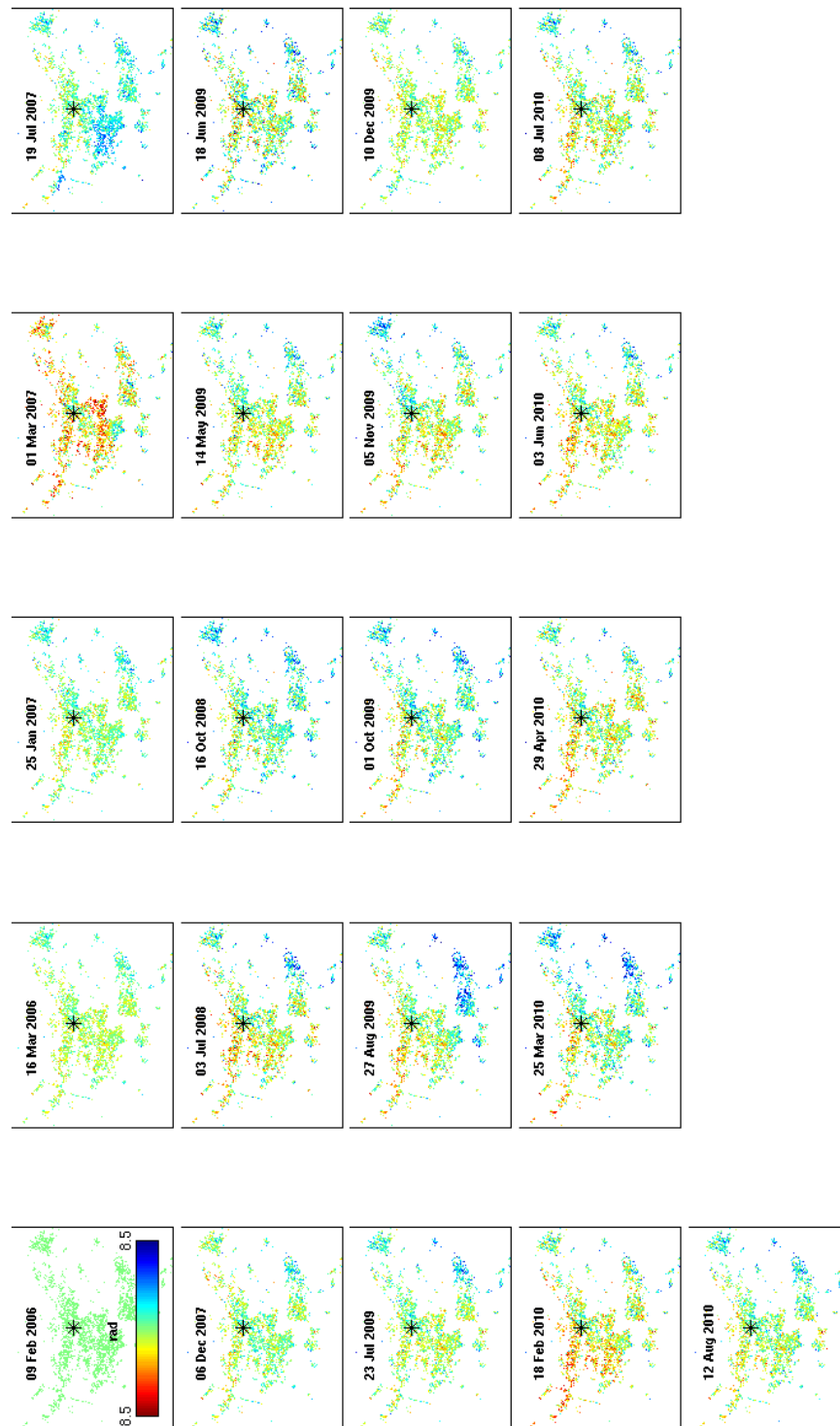


Fig.23. Fase desenvuelta (mm) para los interferogramas iniciales a partir de una única imagen máster. Referenciada a la primera imagen de la serie temporal.



Finalmente, después de realizar las verificaciones necesarias, se representa la velocidad media (Fig. 24) en dirección de la LOS (mm/año) para cada punto PS, junto con su correspondiente valor de desviación estándar (Fig. 25), con el fin de poder analizar a posteriori el tipo y magnitud de las deformaciones durante todo el periodo (2006-2010) de la serie temporal.

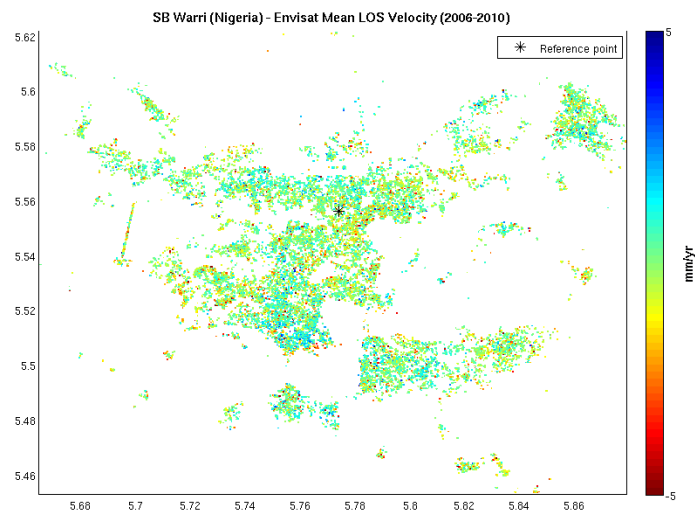


Fig.24. SB. Velocidad media (mm/año) en la dirección LOS. Periodo 2006-2010. Zona de referencia, asterisco.

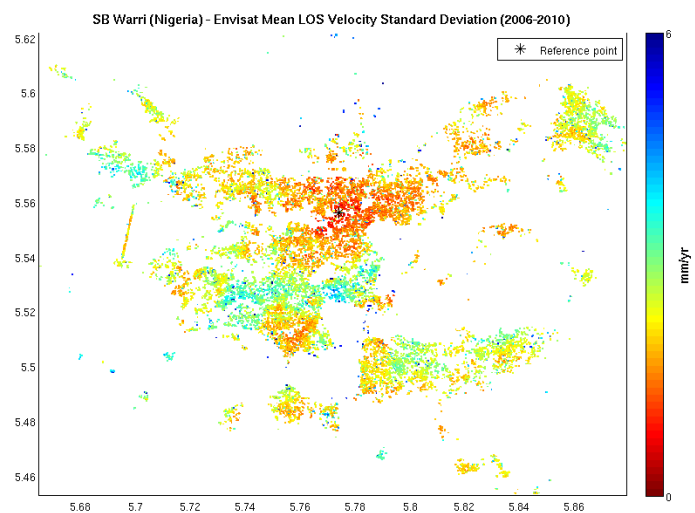


Fig.25. SB. Desviación estándar (mm/año) de la velocidad media en la dirección LOS. Periodo 2006-2010. Zona de referencia, asterisco.

5.4. Procesado Combinado MTI

Hay que tener presente que los dispersores (píxeles) seleccionados en cada procesado son diferentes. Los del procesado PSI corresponden a dispersores en los que hay una respuesta puntual intensa de la reflexión de la señal dentro de cada celda de resolución en el terreno, y las del procesado SB corresponden a dispersores con una intensidad no dominante, sino distribuida dentro de la celda de resolución. Así pues ambos dispersores, que corresponden a píxeles diferentes se pueden fusionar.

Finalmente, los procesados PSI y SB se combinan para ofrecer unos resultados con mejor calidad de estimación. Se obtuvieron un total de 78678 píxeles con fase estable, catalogados así como dispersores persistentes. En la Fig. 26 se muestran conjuntamente las líneas-base de los interferogramas finalmente seleccionados para el método PSI (en azul) y el método SB (en verde).

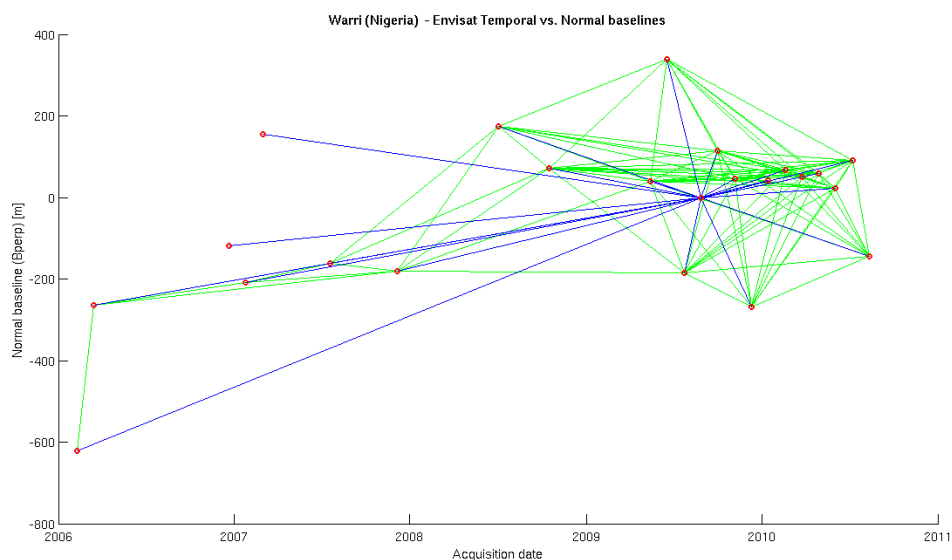


Fig.26. MTI. Líneas-base Temporal vs. Perpendicular. Una única imagen master (azul), interferogramas SB (verde).

Los píxeles seleccionados tanto para el método PS como para el SB, se pueden combinar después de haber completado el paso 5.2.5 para ambos métodos.

A partir del paso 5.2.6 en adelante, el procesamiento es el mismo que para el procesamiento del método de SB.



Al igual que en el procesado SB, los residuos entre la fase desenvuelta para MTI y la predicha a partir de los valores del modelo para una única imagen master, han de ser inspeccionados visualmente junto con la fase enrollada y desenrollada para cada uno. Al igual que para el procesado SB, los residuos aislados dentro del rango de entre $-\pi$ y π (rad) de magnitud serán válidos, pero los residuos correlados espacialmente fuera de estos valores indican problemas en el “unwrapping” en uno o más interferogramas. Si es así, se identifican qué interferograma/s son desenrollados de forma incorrecta, ya que un solo interferograma mal desenrollado puede causar residuos propagados en muchos interferogramas. Una vez realizada la inspección visual de los residuos, se descartan 25 interferogramas (nº 2, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 30, 39, 61, 71, 81, 90, 98, 105, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118), quedando así 107 interferogramas de un total de 132 iniciales. La eliminación de estos interferogramas requiere repetir uno tras otro el cálculo del desenrollado de la fase, el cálculo del error SCLA, la sustracción del mismo antes de repetir el desenrollado y el cálculo de los residuos para todos los interferogramas. A continuación se vuelve a repetir el proceso de “unwrapping” con el nuevo conjunto reducido de interferogramas “válidos”. En la Fig. 27 se pueden observar como mayoritariamente los residuos se encuentra entre los valores $-\pi$ y π . La Fig. 28 muestra la fase desenrollada de los interferogramas convertida a milímetros, es decir, la evolución espacio-temporal de la deformación para una única imagen master y en referencia al primer interferograma (09/02/2006) después de la verificación final del método MTI.

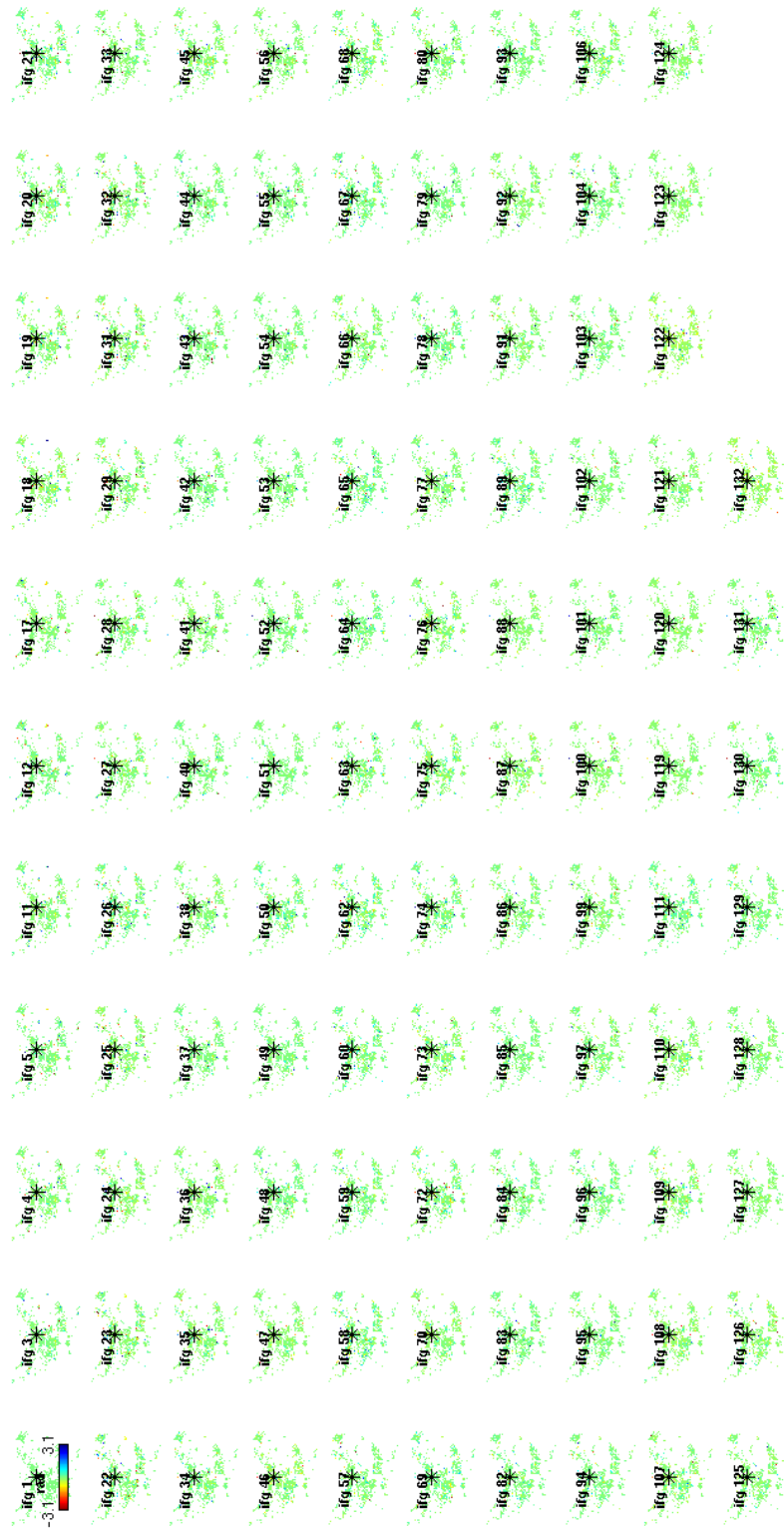


Fig.27. MTI. Residuos (rad) entre la fase desenrollada para SB y la predicha a partir de los valores del modelo para una única imagen master.

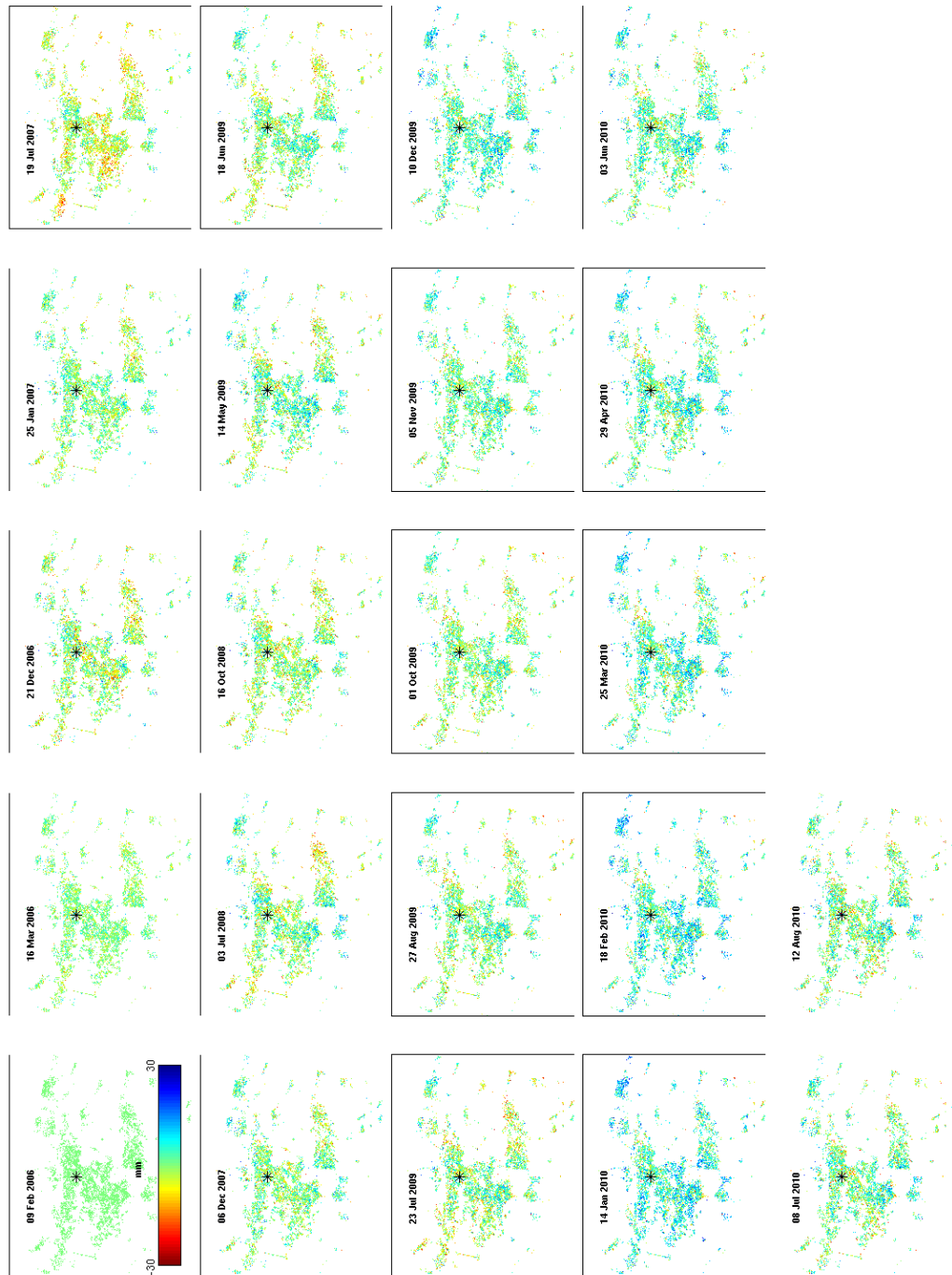


Fig.28. MTI. Fase desenrollada (mm) para los interferogramas iniciales a partir de una única imagen máster y referida al primer interferograma. Referenciada a la primera imagen de la serie temporal.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados finales que serán objeto de análisis e interpretación, son los resultantes del método combinado (PS+SB) final MTI.

En la Fig. 29 se representa la velocidad media (mm/año) en dirección de la línea de visión del satélite (LOS) para cada dispersor persistente (PS), una vez sustraídas las rampas orbitales y el DEM. Esta tasa de velocidad se calcula con respecto a una zona de referencia de estabilidad contrastada (la misma usada que para el procesado PSI y SB). Se ha eleccionado Effurun, en el norte de Warri, como la parte estable de la ciudad, suponiendo que no hay deformación en esta zona según los estudios geológicos/geotécnicos.

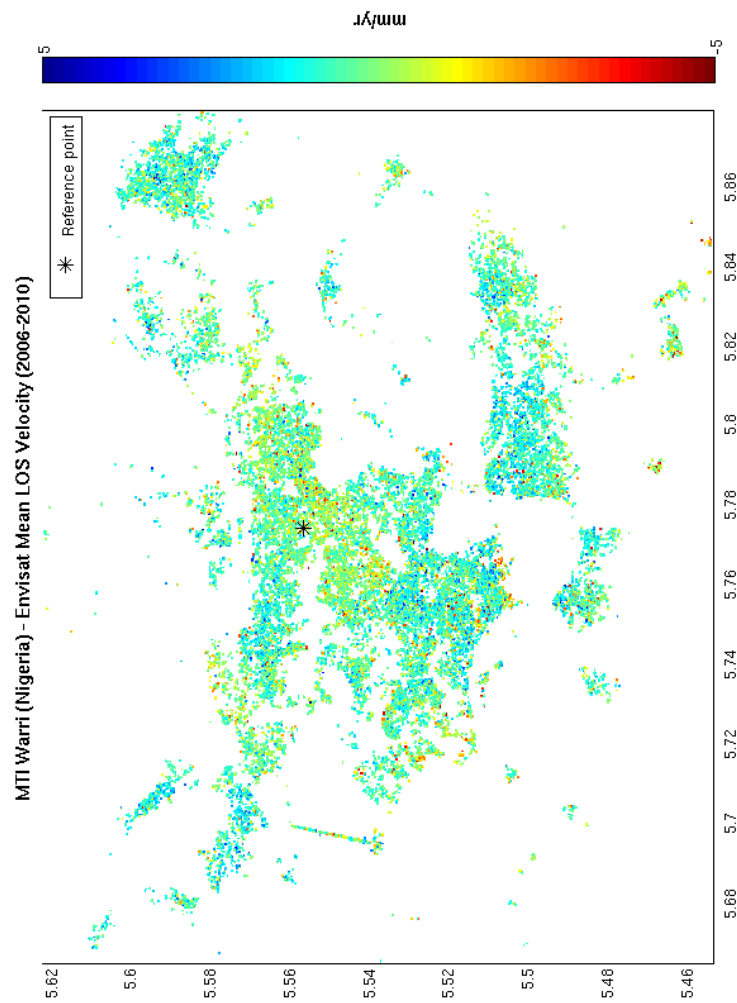


Fig.29. Velocidad media (mm/año) en dirección de la LOS. Serie temporal 2006-2010. Zona de referencia marcada con asterisco.



La desviación estándar de la velocidad media en la dirección de la LOS, en teoría, ha de ser menor a medida que la distancia a la zona de referencia decrece. En la Fig. 30 se puede observar como esto se cumple en líneas generales; no obstante, se aprecia de forma destacada como los valores de desviación estándar son anormalmente mayores en una gran franja al sur de la zona de referencia, alcanzando valores de aproximadamente 2 mm/año. En base a la uniformidad de los valores en esa zona en concreto, se podría pensar que algún factor o característica de ésta está influyendo en el aumento de los valores de desviación estándar con respecto a la distribución general en la zona de estudio. La baja o nula densidad de píxeles PS seleccionados en la porción de terreno sur que delimita la zona anómala, podría hacer pensar que la causa se encuentra en la proximidad a esta porción de terreno de, probablemente, vegetación o superficie inundable con gran decorrelación temporal.

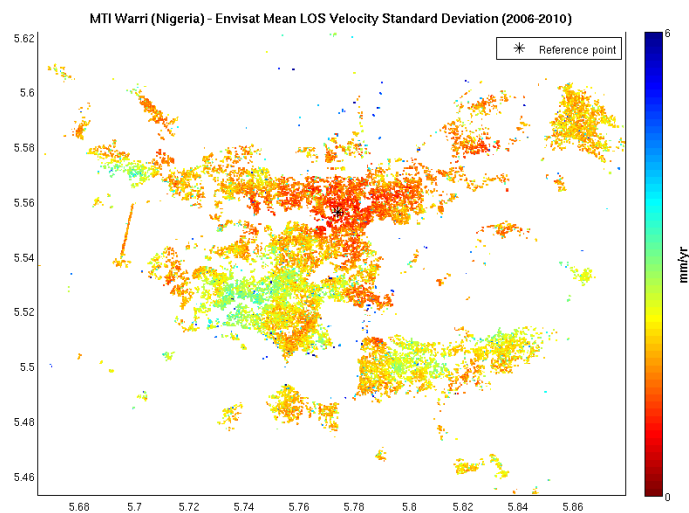


Fig.30. MTI. Desviación estándar (mm/año) de la velocidad media en la dirección LOS. Periodo 2006-2010. Zona de referencia, asterisco.



A continuación, se representan las velocidades medias (Fig. 31) en la dirección LOS y sus respectivas desviaciones estándar (Fig. 32) sobre la imagen de multi-reflectividad media (media de las imágenes de amplitud) para los métodos PSI, SB y MTI, a fin de poder comparar resultados de cada procesado.

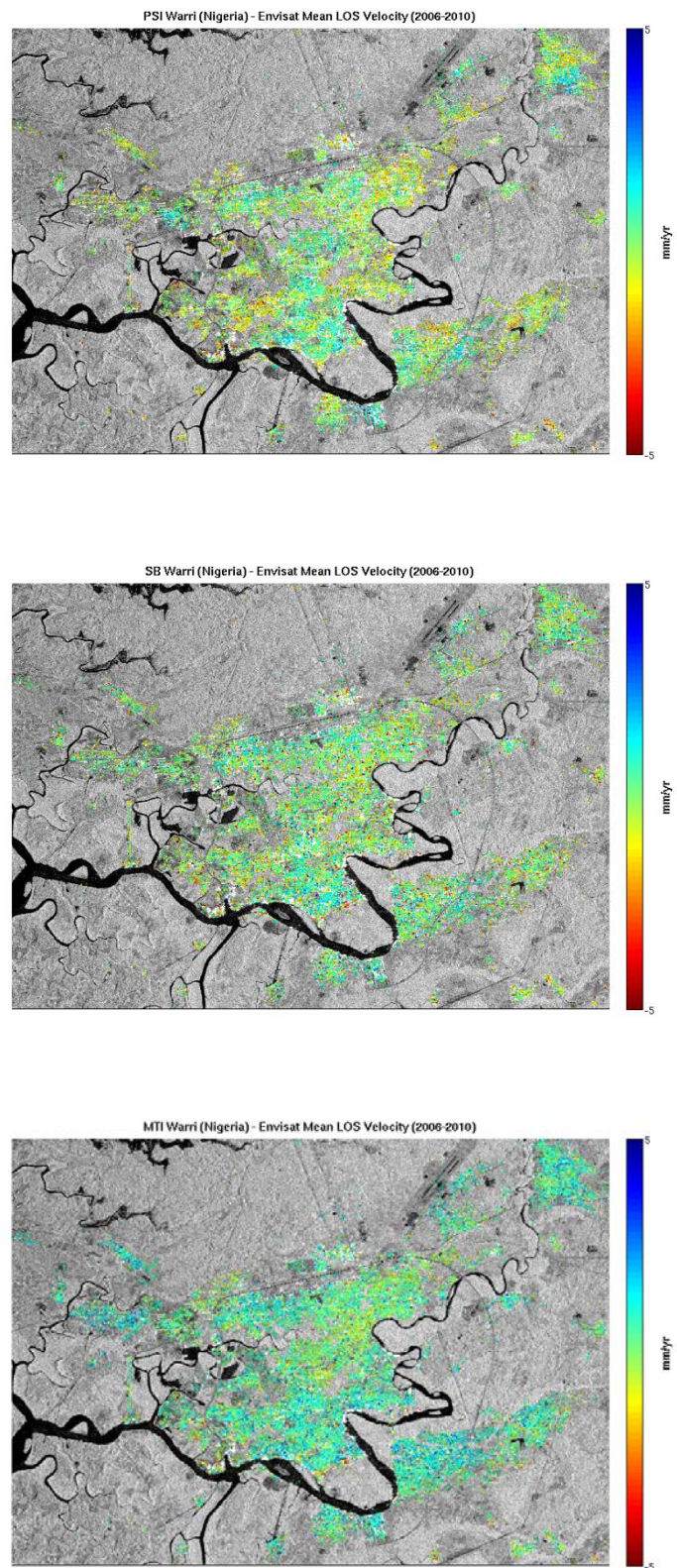


Fig.31. Velocidad media (mm/año) en dirección de la LOS. Sobre imagen de amplitud. Serie temporal 2006-2010. Zona de referencia marcada con asterisco. En orden descendente: para PSI, para SB, y para MTI.

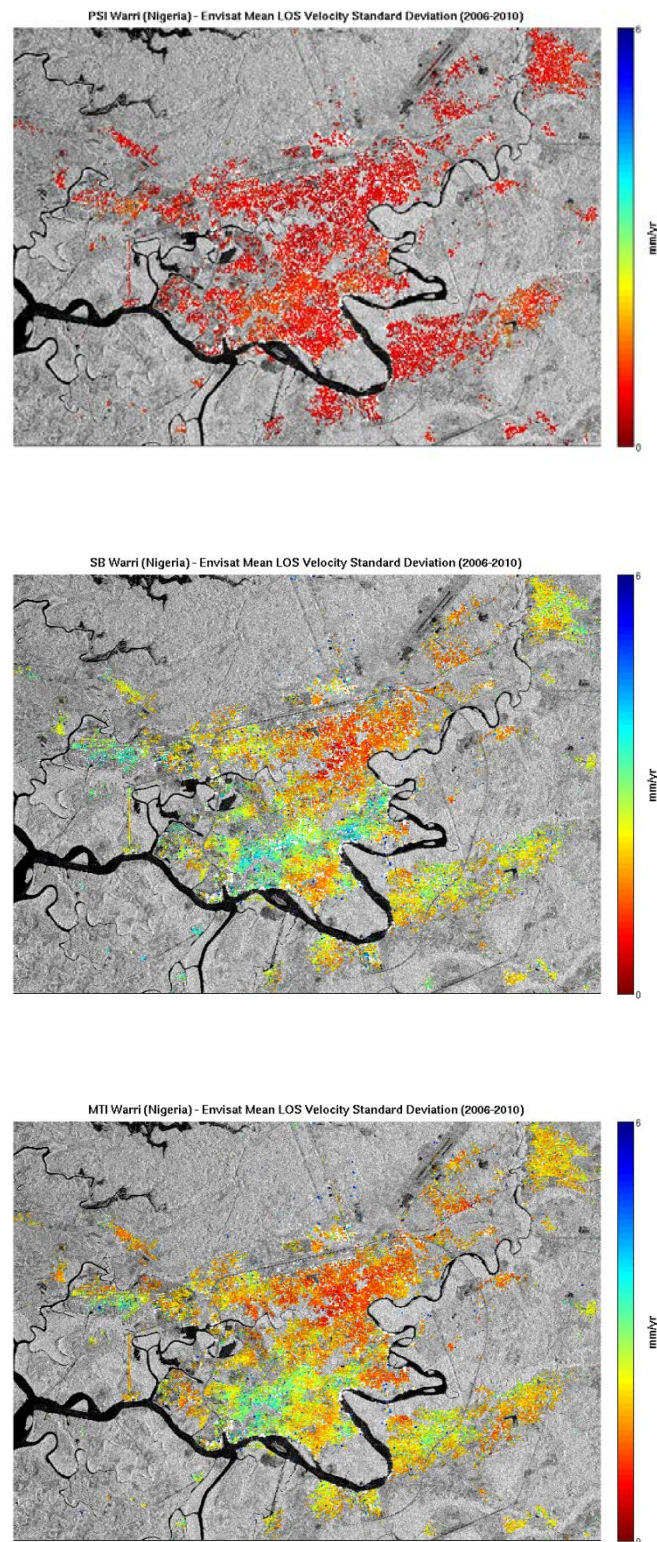


Fig.32. Desviación estándar (mm/año) de la velocidad media en dirección LOS. Sobre imagen de amplitud. Serie temporal 2006-2010. Zona de referencia marcada con asterisco. En orden descendente: para PSI, para SB, y para MTI.

Con el fin de realizar una interpretación más detallada de la zona de estudio, de ésta se seleccionan varios sectores (Fig. 33) que pueden ser susceptibles de interés, dado que son los que presentan movimientos diferenciales entre zonas cercanas. También se incluye la zona referente a la refinería de Warri. A su vez, se seleccionan varios puntos-muestra (1-8) destacados, dentro de los sectores referidos, de entre los que presentan valores más significativos, tanto de elevación como subsidencia. El valor de la deformación de estos puntos-muestra, resulta de la media de los valores de todos los píxeles en un radio de entre 50 y 100 metros alrededor de ellos.

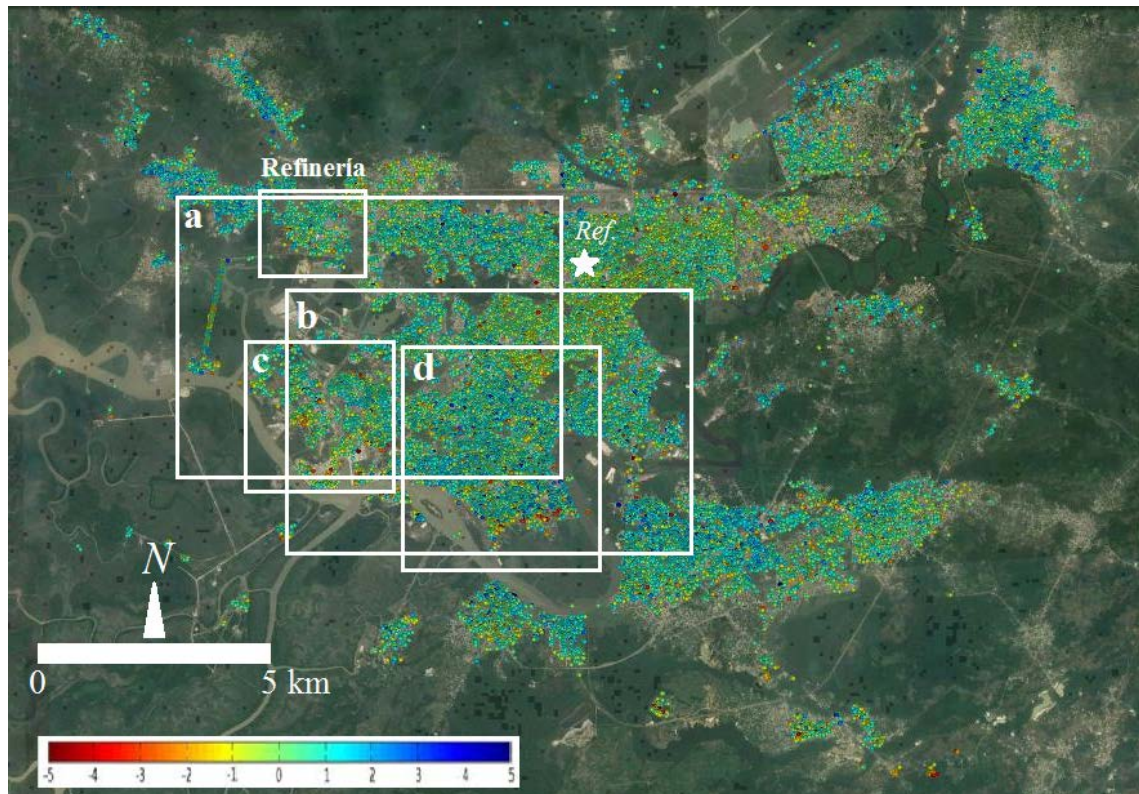


Fig.33. Distribución de sectores (a, b, c, d y Refinería) ampliados (rectángulos blancos), sobre tasas de velocidad media (mm/año) en dirección LOS superpuestas en imagen de Google Earth. Zona de referencia (Ref.) indicada con símbolo estrella.



Resulta de interés desde el punto de vista de la seguridad estructural de las obras civiles, evaluar un tramo de la carretera Jetty (Fig. 34) (sector *a*, puntos 1 y 2) a partir de las diferencias de dos partes diferenciadas en las que se observan desplazamientos opuestos (subsistencia y elevación). El mencionado tramo de carretera, se encuentra dentro del sector *a*, y en ella se sitúan los puntos 1 y 2, de los cuales se representan sus respectivas series temporales (Fig. 35) así como la diferencia entre ambas (Fig. 36).

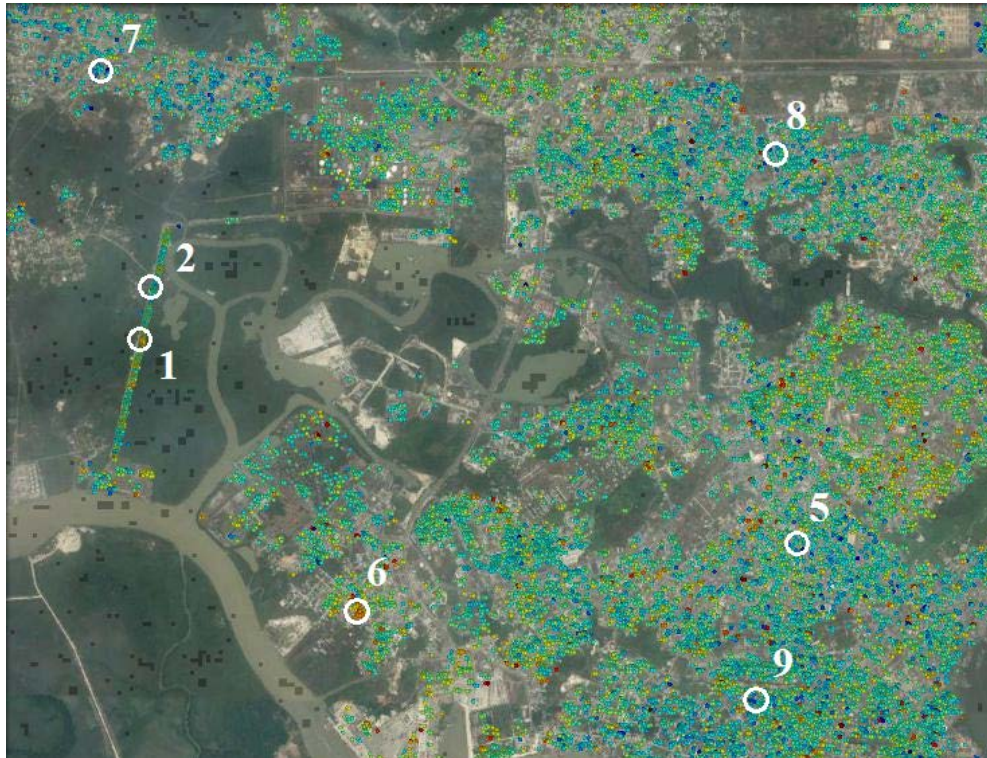


Fig.34. Ampliación del sector *a* (Fig. 33). Puntos-muestra representados (1, 2, 5, 6 y 9).

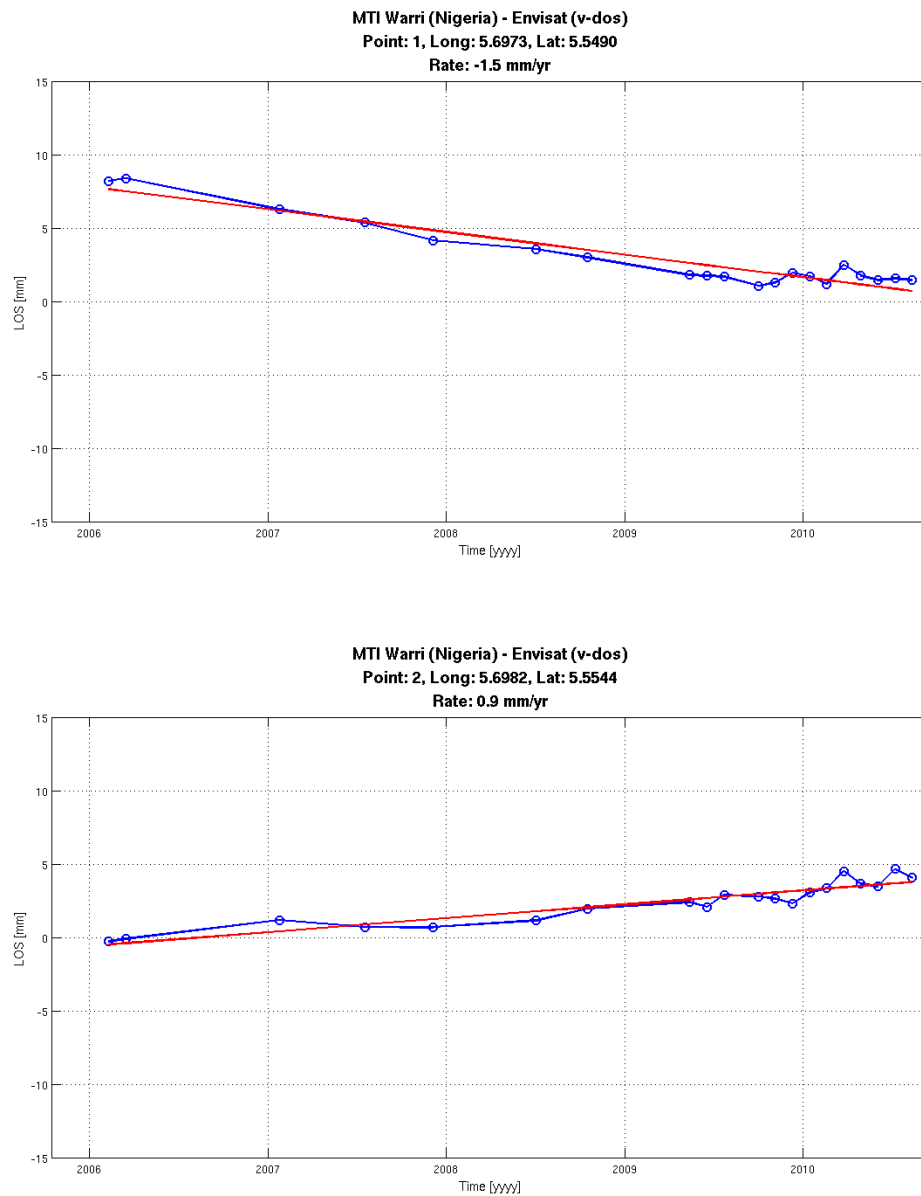


Fig.35. Series temporales de la deformación producida (mm) para los puntos-muestra 1 y 2 sobre la carretera de Jetty.

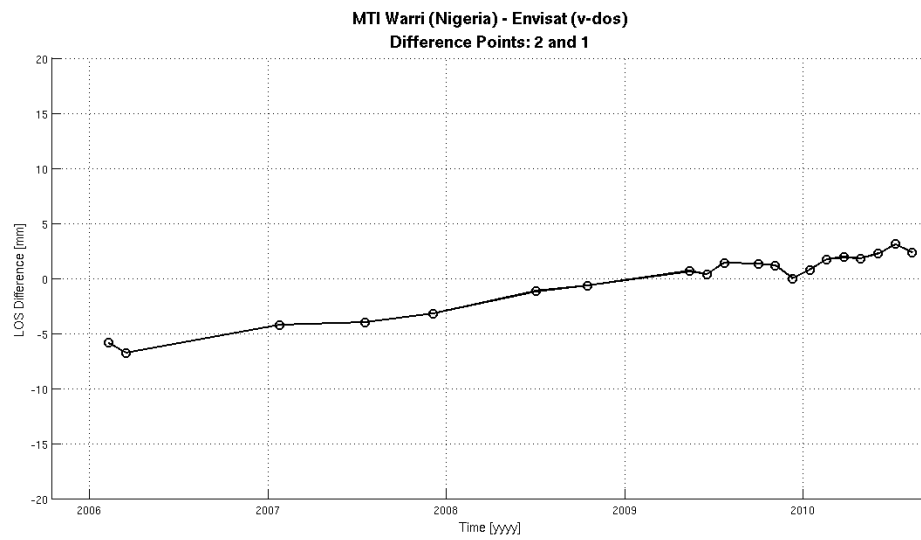


Fig.36. Diferencia entre las deformaciones (mm) de los puntos 1 y 2 sobre carretera de Jetty.



En el sector *b* (Fig. 37), que incluye la mayor parte del núcleo urbano central de la ciudad de Warri, se puede observar que, mayoritariamente, existe una tendencia a la elevación del terreno, excepto en el tercio norte, el margen más meridional del sector (puntos 3 y 4), y una pequeña zona al oeste en torno al punto 6 en las que se producen marcadas subsidencias.



Fig.37. Ampliación del sector b (Fig. 33). Puntos-muestra representados (3, 4, 5, 6 y 9).

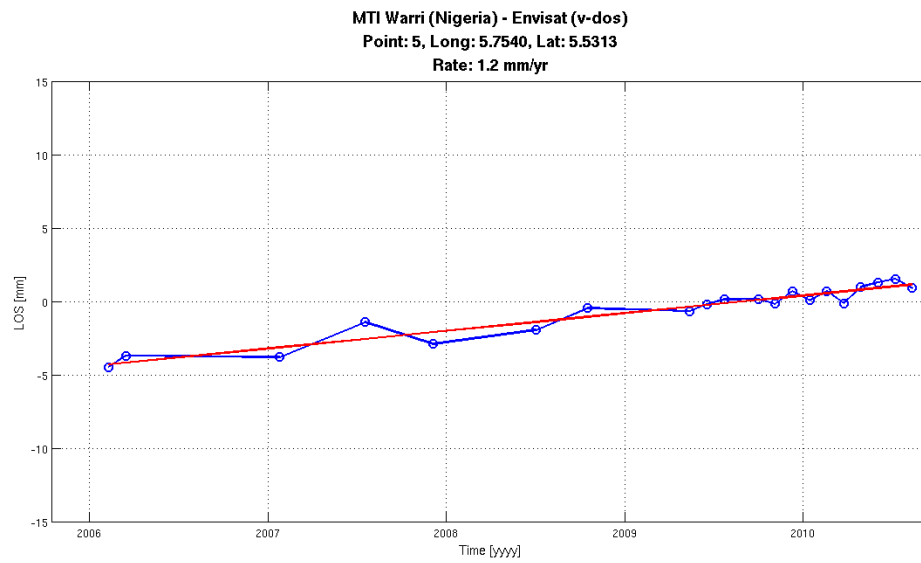


Fig.38. Serie temporal de la deformación producida (mm) para el punto-muestra 5.



El sector *c* (Fig. 39), correspondiente a la zona occidental junto al margen del río, presenta dos zonas de similar extensión con movimientos diferencialmente opuestos, y separadas por la carretera dirección norte-sur que comunica con el puerto fluvial de Warri. Por una parte, un movimiento mayoritariamente subsidente al oeste de la carretera, y otro más acusado movimiento con tendencia a la elevación al este de dicha vía de comunicación.



Fig.39. Ampliación del sector c (Fig. 31). Punto-muestra nº 6 representado.

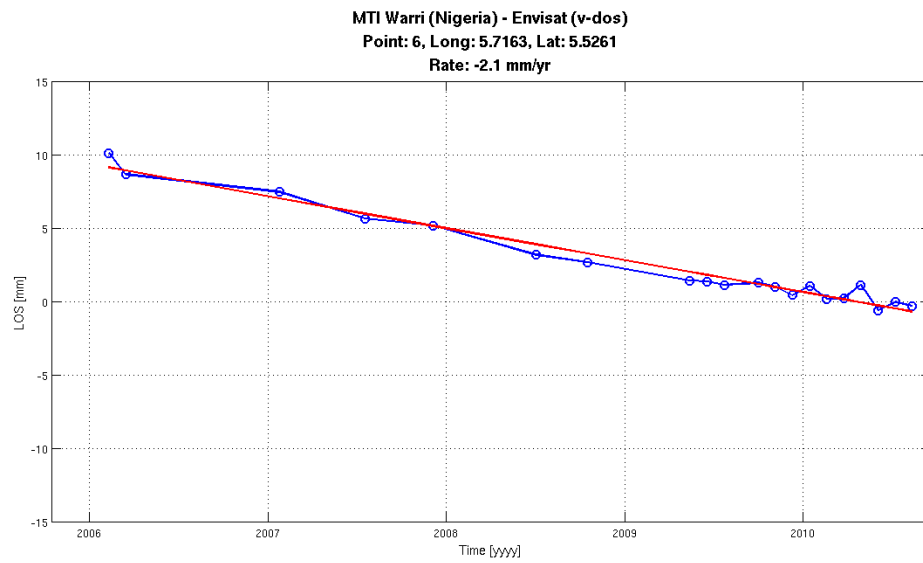
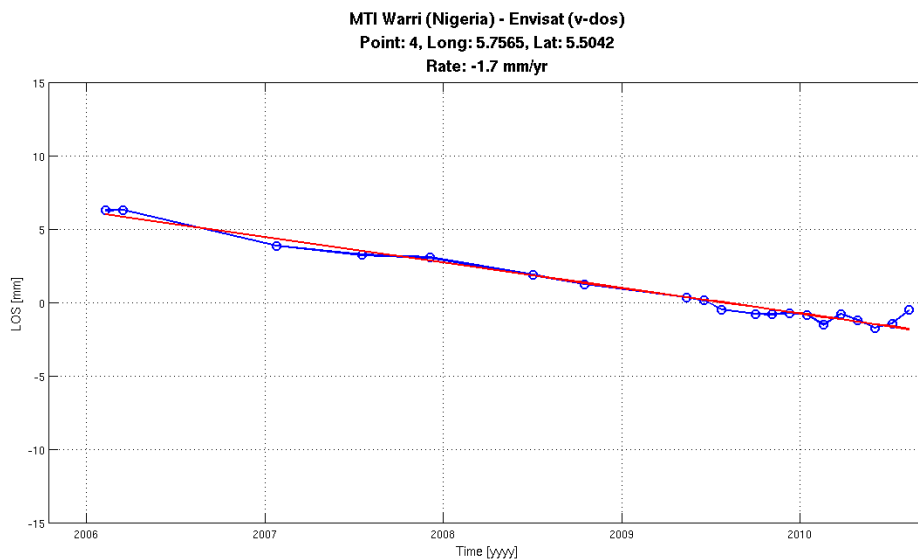
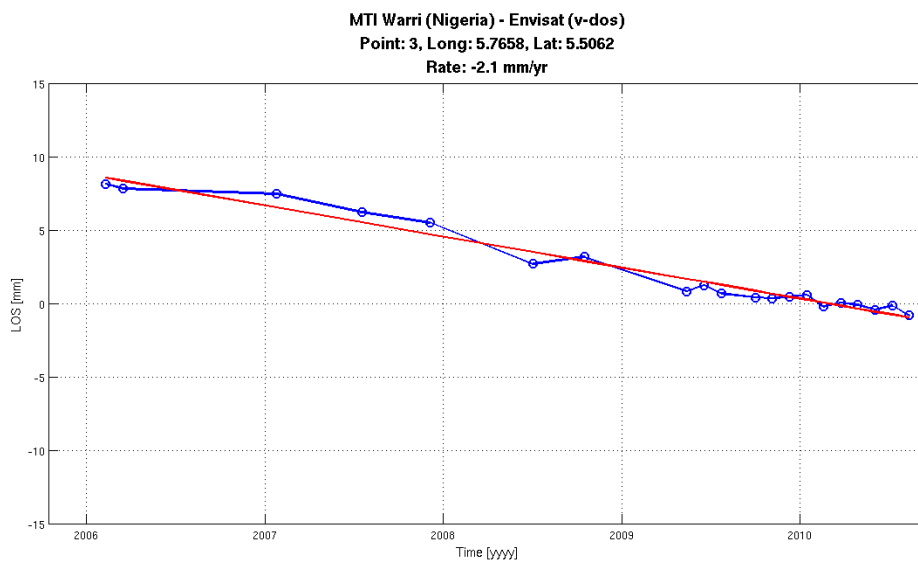


Fig.40. Serie temporal de la deformación producida (mm) para el punto 6.

Una de las más destacadas zonas subsidentes, se sitúa en el sector *d* (Fig. 41), coincidente con el margen meridional del núcleo urbano que se sitúa dentro de un acusado meandro del río. En discrepancia con esto, el sector presenta mayoritariamente una tendencia a la elevación. La diferencia entre estas dos zonas de deformaciones opuestas, representadas en este caso por los puntos 3 y 4 (en subsidencia) y 9 (elevación) (Fig. 42), puede ser útil para evaluar el movimiento de dos bloques relativamente cercanos (Fig. 43).



Fig.41. Ampliación del sector d (Fig. 33). Puntos-muestra (3, 4, 5 y 9) representados.



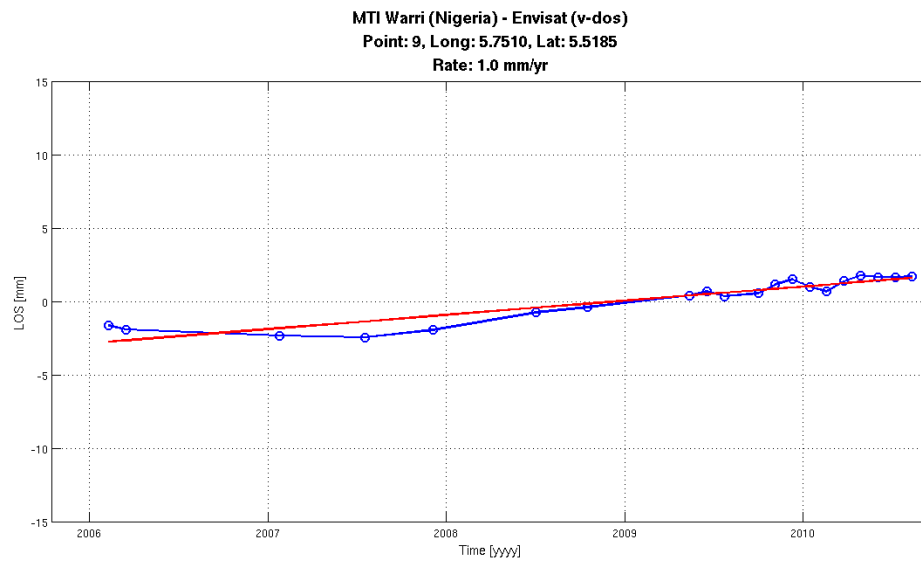


Fig.42. Series temporales de la deformación producida (mm) para los puntos-muestra 3, 4 y 9.

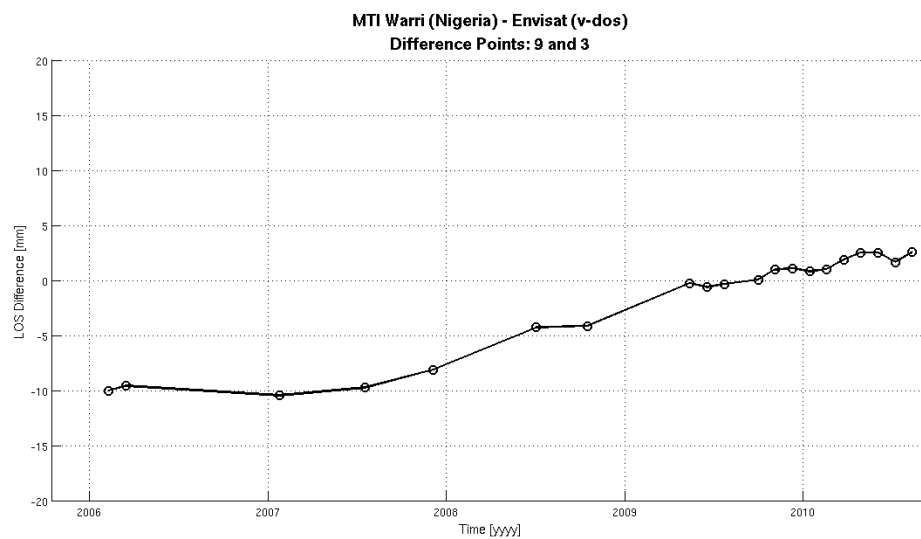


Fig.43. Diferencia entre las deformaciones (mm) de los puntos 9 y 3.



El sector que genera más interés es aquél en el que se encuentra la refinería y petroquímica de Warri (Fig. 44). Ya que, debido a la extracción de petróleo y gas en la zona, la deformación del terreno podría estar acelerándose. En la Fig. 45 que representa la evolución de la fase del sector de la refinería, se aprecia una cierta estabilidad de la zona.



Fig.44. Ampliación del sector de la Refinería (Fig. 33).

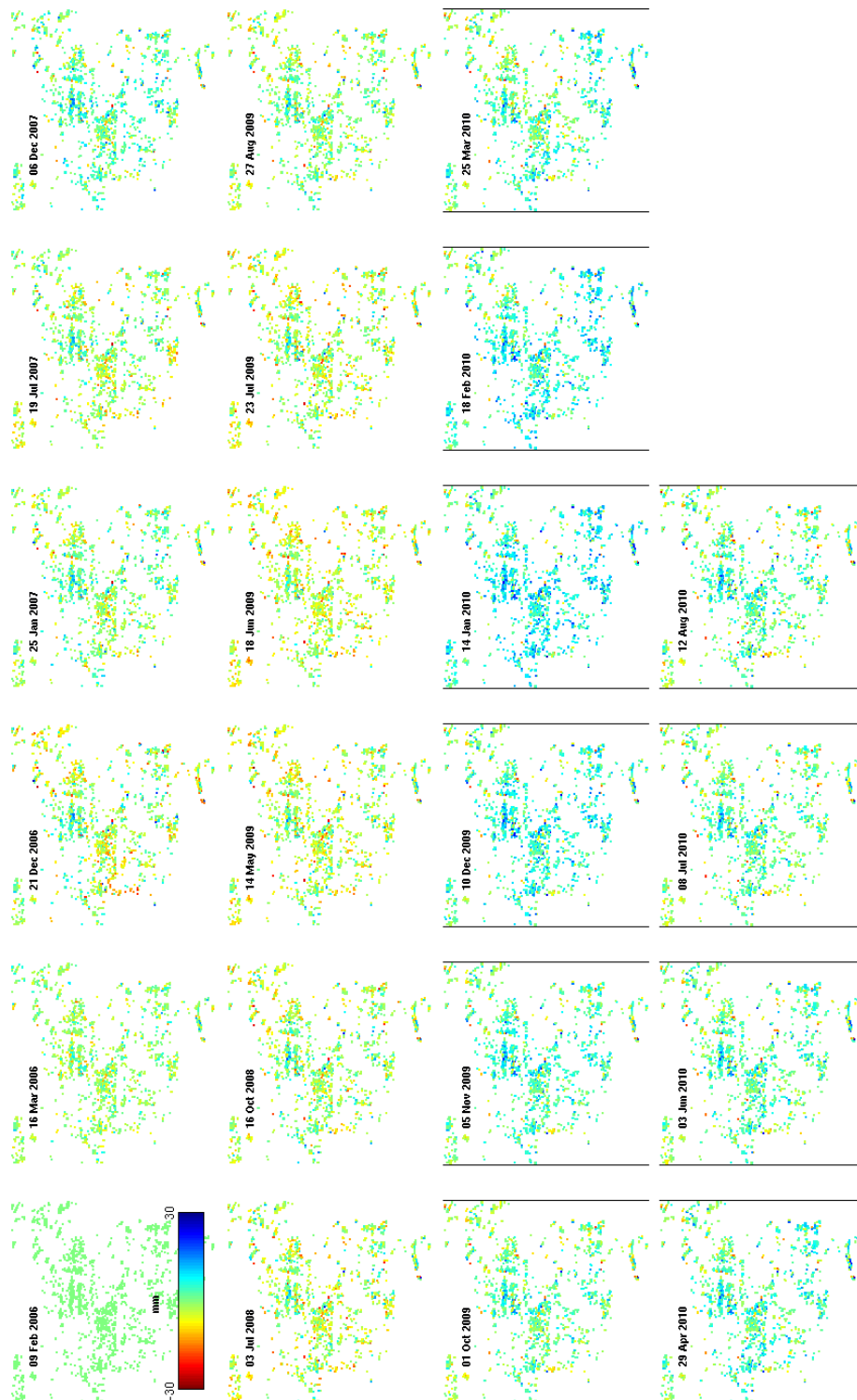


Fig.45. MTI. Fase desenrollada (mm) para los interferogramas iniciales a partir de una única imagen máster, referenciada a la primera imagen de la serie temporal para el sector de la Refinería.



En definitiva, de acuerdo con el patrón de velocidades medias, parece ser que algunos sectores se están hundiendo, mientras que otros se están elevando con respecto a la zona de referencia elegida. Los valores máximos para estas deformaciones se estiman en unos ± 5 mm/año.

Quedan los resultados a disposición de interpretaciones varias por personal cualificado, en base a datos complementarios de tipo geológico, pluviométrico, piezométrico, etc., que pudiesen ayudar a comprender el patrón de deformación y aplicar las acciones necesarias en base a ello.



7. CONCLUSIONES.

Los resultados del procesado interferométrico arrojan resultados coherentes, careciendo de valores groseros que pudiesen deducir algún tipo de problema durante algún paso del proceso, o inducir a errores encadenados. No obstante, los resultados deben de ser contrastados con otro tipo de datos o estudios para valiar los valores obtenidos. Un buen marco de observación multidisciplinar sería de gran ayuda para llegar a una buena conclusión del origen, naturaleza y evolución de las deformaciones existentes en la zona de estudio.

Varios fenómenos de deformación se han encontrado por primera vez en esta región con tasas de velocidad de hasta ± 5 mm/año. Las inundaciones después de los eventos de lluvia, así como la extracción excesiva del agua subterránea puede ser probablemente una explicación de este fenómeno de deformación que pudiera tener una componente estacional. Un análisis más detallado del sistema acuífero en la zona y su recarga después de la infiltración del agua de lluvia, así como la evolución temporal del nivel piezométrico, junto con los datos meteorológicos y de precipitación podría ayudar a comprender el patrón de deformación.

Los resultados de este estudio fueron presentados en el Workshop Internacional *SARWatch: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry*, celebrado del 5 al 7 de octubre de 2016 en Oporto (Portugal) y publicados en la revista *Procedia Computer Science* (Mahmud et al., 2016) indexada en el *Conference Proceedings Citation Index* (Thomson Reuters).



8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

Adam, N., Kampes, B., Eineder, M., Worawattanamatekul, J., Kircher, M., (2003). The Development of a Scientific Permanent Scatterer System. In: Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop.

Adam, N., Parizzi, A., Eineder, M., Crosetto, M., (2009). Practical persistent scatterer processing validation in the course of the TerraFirma project. *Journal of Applied Geophysics* 69 (1), 59–65.

Bähr, H.P., Vögtle, T. (1991). *Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*. Wichmann Verlag, Karlsruhe.

Bamler, R., Hartl, P., (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* 14, R1–R14.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., (2002). A new algorithm for Surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40 (11), 2375–2383.

Chen, W., Zebker, H.A. (2000). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 18, 338-351.

Chen, W., Zebker, H.A. (2001). Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *Journal of the Optical Society of America A*, 18, 338-351.

Chen, W., Zebker, H.A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 1709-1719.

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.

Crosetto, M., Arnaud, A., Duro, J., Biescas, E., Agudo, M., (2003). Deformation monitoring using remotely sensed radar interferometric data. In: Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini.

Crosetto, M., (2004). Deformation measurement using interferometric SAR data. In: Proceedings of the XXth ISPRS Conference, July 2004, Istanbul (TR). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing*, Vol. XXXV, Part B (CD-ROM).



Duro, J., Closa, J., Biescas, E., Crosetto, M., Arnaud, A., (2005). High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data, In: Proceedings of the 6th Geomatics Week Conference, February, Barcelona, Spain, unpaginated CD-ROM.

Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. and Alsdorf, D. (2007) The Shuttle Radar Topography Mission. Review of Geophysics, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatters in differential SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 38 (5), 2202–2212.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., (2001). Permanent scatters in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39 (1), 8–20.

Ferretti, A., Tamburini, A., Novali, F., Fumagalli, A., Falorni, G., Rucci, A. (2011). Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring. Energy Procedia. 43465–3471. ISSN: 1876-6102; 39, 1, 8–20.

Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., Zebker, H.A., (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research 94 (B7), 9183–9191.

Geudtner, D., Schwäbisch, M. (1996). An algorithm for precise reconstruction of InSAR imaging geometry: Application to "flat earth" phase removal, phase-to-height conversion and geocoding of InSAR-derived DEMs. In: European Conference on Synthetic Aperture Radar, Konigswinter, Germany, 26–28 March 1996, Konigswinter, Germany.

Hanssen, R.F., (2001). Radar interferometry data interpretation and error analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 328 pp.

Hooper, A., (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. Geophysical Research Letters 35, L16302.

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.



Hooper, A., Segall, P., Zebker, H., (2007). Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos, *Journal Geophysical Research*, 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arıkan, M., (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics* 514–517, 1–13, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>.

Kampes B.M., Hanssen R.F., Perski Z. (2003). Radar interferometry with public domain tools. In: Third ESA International Workshop on ERS SAR Interferometry 'FRINGE03', Frascati, Italy, 1-5 December 2003. 6 pp.

Kampes, B., (2005). Displacement Parameter Estimation Using Permanent Scatterer Interferometry. Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorqui, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., (2004). A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42 (7), 1377–1386.

Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., Pepe, A., (2007). An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis. *Pure and Applied Geophysics* 164 (4), 637–661.

Lyons, S., Sandwell, D., (2003). Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking. *Journal of Geophysical Research* 108 (B1), 2047–2070.

Mahmud, M.U., Yakubu, T.A., Oluwafemi, O., Sousa, J.J., Ruiz-Armenteros, A.M., Arroyo-Parras, J.G., Bakoń, M., Lazecký, M., Perissin, D. (2016). Application of Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar (MT-InSAR) technique to Land Deformation Monitoring in Warri Metropolis, Delta State, Nigeria. *Procedia Computer Science*, 100, 1220-1227.

Marinkovic, P., Ketelaar, V.B.H., van Leijen, F.J., Hanssen, R.F., (2008). InSAR quality control: analysis of five years of corner reflector time series. In: Proceedings of the Fifth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, 'FRINGE07', Frascati, Italy, 26 Nov–30 Nov 2007, Noordwijk, pp. 1–8. ESA Communication Production Office.

Peltier, A., Bianchi, M., Kaminski, E., Komorowski, J.-C., Rucci, A., Staudacher, T., (2010). PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise. *Geophysical Research Letters* 37, L12301, <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL043846>.



Rosen, P., Hensley, S., Joughin, I., Li, F., Madsen, S., Rodriguez, E., Goldstein, R., (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE* 88 (3), 333–382.

Samson J. (1996). Coregistration in SAR interferometry. Master's thesis, Faculty of Geodetic Engineering, Delft University of Technology.

Schmidt, D.A., Bürgmann, R., (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research* 108 (B9), 2416–2428.

Schwäbisch, M. (1995). Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemod. Forschungsbericht 95-25, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen.

Shewchuk, J.R. (1996). Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. In: *First Workshop on Applied Computational Geometry* (Philadelphia, Pennsylvania). Association for Computing Machinery, 124-133.

Shewchuk, J.R. (2002). Constrained Delaunay Tetrahedralization and Provably Good Boundary Recovery. In: *Proc. of 11th Intl. Meshing Roundtable*.

Van der Kooij, M., Hughes, W., Sato, S., Poncos, V., (2006). Coherent target monitoring at high spatial density: examples of validation results. European Space Agency, (Special Publication), ESA SP-610.

Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A., (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping. 2003 IEEE Int. Geosci. and Remote Sensing Symposium. (IGARSS) 7, 4362–4364.