

Interferometría SAR en las islas Shetland del Sur: modelo numérico de elevaciones de la Isla Decepción

SAR Interferometry in South Shetland Islands: numerical elevation model of Deception Island

M. CASTILLO⁽¹⁾, F. PÉREZ⁽²⁾, V. PALÀ⁽²⁾ y J. CALVET⁽¹⁾

(1) Departament de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, Zona Universitària de Pedralbes. 08028 Barcelona

(2) Institut Cartogràfic de Catalunya, Parc de Montjuïc. 08038 Barcelona

RESUMEN

La interferometría con imágenes de radar de apertura sintética (SAR: Synthetic Aperture Radar) desde satélite es una técnica que permite obtener información altimétrica del relieve terrestre, siendo especialmente útil en áreas remotas. Este trabajo muestra una aplicación de esta técnica en las islas Shetland del Sur (Antártida). Para ello se han utilizado imágenes SAR obtenidas por los satélites ERS (European Remote Sensing) de la Agencia Espacial Europea (ESA: European Space Agency) y un proceso interferométrico desarrollado entre el Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona y el Institut Cartogràfic de Catalunya.

En este documento se describen el proceso, los datos y la generación de un Modelo Numérico de Elevaciones (MNE) de la Isla Decepción.

Palabras Clave: Radar. SAR. Interferometría. Altimetría. Antártida.

ABSTRACT

Satellite Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry is a technique that allows the generation of altimetric information. The technique is highly useful in remote areas and this paper shows an application of SAR interferometry in the South Shetland Islands (Antarctica). SAR images obtained by the ERS (European Remote Sensing) satellites of the European Space Agency (ESA) have been processed with an interferometric processor developed by the Departament de Geodinàmica i Geofísica of the Universitat de Barcelona in collaboration with the Institut Cartogràfic de Catalunya.

Below, we describe the processor, the data and the generation of a Numerical Elevation Model of Deception Island.

Keywords: Radar. SAR. Interferometry. Altimetry. Antarctica.

Introduction

At present, SAR Interferometry (INSAR) is an application of radar images with great future perspectives for the extraction of topography. SAR interferometry uses two SAR images of the same scene, using two spatially separated antennas or two different observations with a single antenna. Microwave capabilities allow SAR images to be generated independently of atmospheric and illumination conditions. If satellite platforms are used, SAR images allow extensive surface coverage. Thus, INSAR becomes a perfect tool in obtaining altimetric information in remote areas at a very low cost. This technique also allows the detection and evaluation of small terrain movements. South Shetland thus provide a privileged INSA test area. There in the added incentive that kinematic active areas are present due to vulcanism and glacial dynamic processes.

SAR Interferometry

Each pixel of a SAR image contains information associated with the signal returned by the observed terrain. This signal is characterized by the amplitude and the phase of the returned wave. The amplitude is related to the energy reflected by the terrain and allows imaging where the backscattering of the scene can be observed. The phase is closely connected with the wave path between the sensor and the target and indicates the number of wave oscillations along the path.

Unlike other topography extraction applications of SAR images, where only the signal modulus information is considered in order to derive altimetry, INSAR involves the signal phase. The phase difference between the signals of two images is closely related to the difference in the path of the signal from the observed target to the two geometric positions of the antennas (Fig. 1). In Equation (1), SR_2 and SR_1 are the distances between the terrain and the satellite positions and λ is the wavelength used by the SAR. The height of each point introduces a path difference in the wavefront observed in the two images. The phase difference in the waves can be used to derive topographic information and a Numerical Elevation Model (NEM) of the observed area can be generated.

SAR Interferometric Process

The implemented interferometric process is composed of a sequence of algorithms for the generation of NEMs using two SAR images. All the algorithms are coded in standard FORTRAN and can be run in a PC platform with WINDOWS95/NT environment. These procedures have been developed on the basis of interferometric algorithms previously tested at the Institut Cartogràfic de Catalunya.

Interferometric Registration

The procedure for obtaining an interferogram is called interferometric registration. One SAR image is selected as reference image and serves as the master image that defines the frame where the interferogram is built. Thus, the interferogram has the same SAR geometry. Then, corresponding points between the master image and the other (slave) image are found. For this purpose, different registration techniques exist (Gabriel and Goldstein, 1988; Goldstein et al., 1988; Prati and Rocca, 1990). In our case, the maximum modulus of complex coherence (Equation 2) was used. Thus, a polynomial transformation between the images can be calculated. With this transformation, the corresponding point of the slave image is estimated for each point of the master image, and the phase difference is obtained. Finally, phase differences are assigned to points on the master image.

The maximum value of modulus of the complex coherence, after interferometric registration, is a good estimator of the signal degradation and the quality of the phase differences (Prati and Rocca, 1990). In a way similar to

standard correlation, this parameter scales the signal variations between 1, absence of changes and 0, maximum variation.

SAR Image Formation Model

The definition of an accurate SAR Image Formation Model (MFIS) was one of our main objectives in order to obtain geocoded interferometric products. The model is at the same time simple and precise and similar definitions can be found in Meier et al. (1993), Tannous and Pikeroen (1994) and Castillo et al. (1996)

Some MFIS parameters related to the orbits and the SAR processing are known only approximately. In order to define an accurate MFIS, these parameters are determined with precision by a bundle adjustment. This procedure consists of a least squares iterative adjustment of parameters for a set of images using a set of ground control points for each image and the corresponding points obtained in the registration (Castillo et al., 1996).

Systematic Phase Differences

When the terrain scatterers move away in slant range, the phase differences increase systematically and a high number of fringes appear. The main cause of these fringes is the Earth's surface shape. The systematic fringes are modulated both by baseline variations (distance between the two involved sensor positions) and scene relief. If the orbits are not exactly parallel, baseline variations add systematic phase differences (Gabriel and Goldstein, 1988). However, scene relief introduces non-systematic fringes. The phase unwrapping methods explained below have different application ranges depending on fringe complexity. In order to simplify the next step in the interferometric process, systematic and non-systematic fringes must be treated separately.

Using the adjusted MFIS of the two images, the systematic component can be estimated by a simulation of the phase differences. The simulated interferogram is subtracted from the registered interferogram and the non-systematic interferogram (relief interferogram) is extracted. The resulting fringes are caused mainly by relief. However, unpredictable non-modeled effects also exist (caused by differential atmospheric conditions and land cover changes). These effects may be important or negligible, depending on the baseline.

Phase Unwrapping

Owing to the ambiguity in the number of phase cycles, a process of phase reconstruction has been performed. This reconstruction is referred to an arbitrary point where the integration of phase differences begins. Later, the integration is extended to all the interferogram points. The final NEM will be height-shifted because is referred to the initial integration point. The reconstruction process is known as phase unwrapping.

The real phase difference between two adjacent points depends basically on the scene sampling. As a first approximation, the reconstruction process considers that between adjacent pixels the phase difference is less than a half-cycle. However, phase differences greater than a half-cycle are not completely removed by the image sampling. The existence of these differences is known as phase aliasing. Other additional facts that produce phase aliasing are the geometric distortions associated with SAR imagery.

At present, many bidimensional phase unwrapping algorithms exist. These algorithms are widely described in the available INSAR literature. A good comparison appears in Pritt (1997). The algorithms implemented in our process are: direct integration, integration with branch cuts and masks, integration by region growing and reconstruction by weighted least squares method. Each algorithm has a wide range of applications depending on the fringes and the noise present in the interferograms. Thus, different algorithms are applied to systematic and non-systematic interferograms and the unwrapped interferograms must be added.

Interferometric NEM generation

Different techniques exist for transforming the phase differences into heights (Gabriel and Goldstein, 1988; Goldstein et al., 1988; Prati and Rocca, 1990). In a first step, these techniques assume a differential phase-to-height approximation that will then be integrated pixel-to-pixel in order to generate a NEM for the entire observed scene. The obtained NEM must be geometrically transformed into the desired cartographic projection output. The method implemented in our interferometric process is more direct and accurate because the NEM is generated without differential approximations into a cartographic projection in one single step (Castillo et al., 1996). This method applies to an unwrapped interferogram that includes both systematic and non-systematic contributions to phase differences. Using the MFIS of the involved images, phase differences are transformed directly into a NEM in a cartographic projection.

Results on Deception Island

Two SAR images covering Livingston and Deception Islands, obtained by the satellites ERS-1/2 operating in tandem with an interferometric baseline of 119 meters, were been used (Fig. 2). The selected images are:

- * ERS-1: 11-Feb-1996 04:04:58.679 GMT Track: 390 Frame: 5895
- * ERS-2: 12-Feb-1996 04:04:59.716 GMT Track: 390 Frame: 5895

Other auxiliary information was also considered. Thus, maps DOS (1968), ICC-UB (1991) and SGE (1997) were used as reference cartography and the local geodetic datum for Deception Island described in NIMA (1997) was been used as an altimetric reference.

The described interferometric process (Fig. 3) was applied to a subscene of the interferometric pair centered on Deception Island (Fig. 4). Firstly, a set of ground control points were identified in the images and the reference cartography in order to accurately define the MFIS for each image. A set of corresponding points were also identified in the images to calculate the transformation required for the interferometric registration. After systematic phase differences removal, an interferogram with phase differences associated with the relief (Fig. 5) and its coherence (Fig. 6) were generated. Then, the phase differences were unwrapped using different reconstruction methods depending on the degree of coherence. Thus, an interferogram with unwrapped non-systematic phase differences was obtained (Fig. 7). Finally, using the adjusted MFISs and the unwrapped interferogram with the systematic and non-systematic contributions added, an interferometric NEM of Deception Island (Fig. 8) was produced.

Conclusions

A Numerical Elevation Model of Deception Island was generated and the results are highly similar to the existing cartography (Fig. 9). Due to the analogic nature of the available cartography a quantitative analysis is not possible. However, taking into account the results obtained with a similar interferometric process (Castillo et al., 1996), a feasible estimation of errors is on the order of mean errors less than 5 meters RMS error in low relief areas and greater than 10 to 25 meters in rugged areas. Such medium errors are closely connected to the correction of distortions present in SAR images during the NEM generation. Thus, SAR oriented slopes are highly distorted by observation geometry and produce a number of errors when corrected. This problem can be solved using interferometric pairs obtained from descendent orbits to change the distorted slopes observed from ascendent pairs and vice-versa.

Other sources of altimetric errors are the coherence loss caused by changes of the observed materials and the atmospheric effects produced by different propagation conditions during the different orbital passes. These errors can be avoided only with the aid of simultaneous images or by using several interferometric pairs to compensate the results. Another critical point in the interferometric process is phase unwrapping. However, unwrapping method efficiency depends on the interferogram quality. Thus, performance will improve by using simultaneous images.

Despite the difficulties associated with the application of the interferometric process, the obtained results are encouraging for application to the detection of kinematic terrain properties. Differential interferometric techniques exist that allow the detection of small terrain movements by using more than one interferometric pair. The algorithms and results of the present paper are a first approximation to this objective.

INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones de las imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) con mayores perspectivas de futuro de cara a la extracción de información topográfica, es la Interferometría SAR (INSAR). En esta técnica se utilizan dos imágenes de la misma zona tomadas por dos antenas separadas espacialmente (desde avión) o por dos observaciones diferentes (desde satélite) (Fig. 1). Al trabajar en el rango de las microondas se pueden generar imágenes independientemente de las condiciones atmosféricas y de iluminación. Además, si las imágenes se obtienen desde satélite, ésta técnica se beneficia de una gran cobertura de la superficie terrestre. De esta manera, INSAR se convierte en una herramienta adecuada para obtener altimetría en áreas remotas con un coste relativamente bajo. Esta técnica permite también la detección y cuantificación precisa de pequeños movimientos del terreno.

Este trabajo tiene por objeto poner a punto un proceso interferométrico y su aplicación a las islas Shetland del Sur. En dicho archipiélago existen áreas con alta actividad desde el punto de vista cinemático, causada por procesos de vulcanismo (Isla Decepción) o por la dinámica glacial. Se espera realizar así una monitorización extensiva de la cinemática relacionada con los diferentes fenómenos geológicos activos. Sin embargo, la disponibilidad de imágenes SAR adecuadas para aplicar esta técnica sobre el área de interés es limitada. Por ello, en un primer momento, el proceso interferométrico se ha aplicado a la generación de modelos numéricos de elevaciones (MNE). Éstos, junto con la utilización de nuevas imágenes, servirán de base para evaluar pequeños movimientos del terreno.

INTERFEROMETRÍA SAR

Una imagen SAR contiene, en cada píxel, información asociada a la señal retornada por el terreno observado. Esta señal se caracteriza por la amplitud y la fase de la onda retornada. La amplitud está relacionada con la energía reflejada por el terreno y permite construir una imagen en la que se aprecia la retrodispersión de los diferentes elementos de la escena observada. Por otra parte, la fase de la señal está relacionada con el recorrido de ida y vuelta de la onda radar entre el sensor y el terreno, e in-

dica el número de oscilaciones que la onda ha realizado durante el tiempo de ida y vuelta.

A diferencia de otros métodos de generación de altimetría con imágenes SAR, donde se utiliza la amplitud de la señal para derivar la topografía del área observada (radargrametría), INSAR utiliza exclusivamente la fase de la señal. La diferencia de fase DF entre las señales asociadas a un mismo punto en dos imágenes está directamente relacionada con las diferencias de recorrido de la señal entre las posiciones desde las que se realizan las dos observaciones y el punto del terreno (Fig. 1) según la siguiente expresión:

$$= 4 \pi (SR_2 - SR_1) / \lambda$$

donde SR_2 and SR_1 son las distancias entre el punto del terreno y cada una de las posiciones del satélite y λ es la longitud de onda utilizada por el radar.

La diferencia de recorrido entre las dos señales está relacionada geoméricamente con la altura del punto observado. Así, las diferencias de fase se pueden utilizar para calcular la altura de cada punto del área observada. De esta forma, y teniendo en cuenta la geometría de observación, es posible generar un Modelo Numérico de Elevaciones (MNE) de la zona de interés.

PROCESO INTERFEROMÉTRICO SAR

El proceso interferométrico implementado consiste en una secuencia de algoritmos para la generación de modelos numéricos de elevaciones a partir de dos imágenes SAR. Todos los algoritmos están codificados en FORTRAN estándar y son ejecutables en una plataforma PC con entorno WINDOWS95/NT. Han sido desarrollados basándose en la definición de los algoritmos interferométricos probados en el Institut Cartogràfic de Catalunya en colaboraciones anteriores y constituyen el núcleo de una futura librería de proceso de imágenes SAR. Los diferentes módulos del proceso pueden adaptarse fácilmente a diferentes sensores SAR, plataformas y formatos. Actualmente están adaptados al producto interferométrico más estándar, que es el generado con el SAR embarcado en los satélites ERS de la ESA, el formato SLC (Single Look

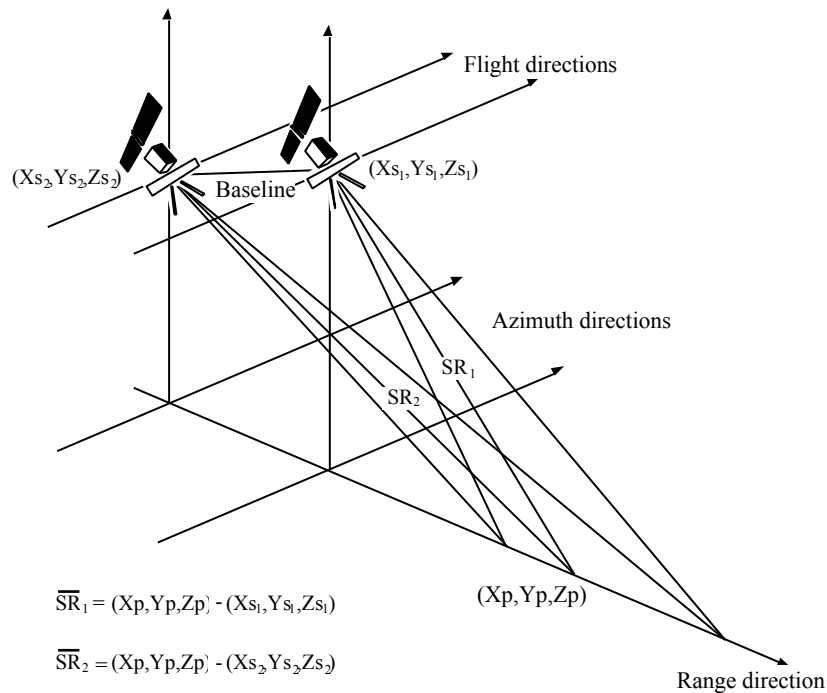


Figura 1: Geometría INSAR.

Figure 1: INSAR geometry.

Complex). Una onda es representable mediante un número complejo cuyo módulo se corresponde con la amplitud de la onda y su fase con la fase de la onda. Los productos SLC, para cada punto de la imagen SAR, contienen las componentes real y compleja de la señal retornada. Por ello también se denominan imágenes complejas.

Registro interferométrico

El primer paso en el proceso interferométrico es la generación de una imagen con las diferencias de fase (interferograma) entre dos imágenes SAR. Éstas se toman en sucesivos pasos del satélite por la misma órbita, pero aprovechando la existencia de perturbaciones orbitales que hacen que las trayectorias no sean exactamente coincidentes. Si los dos pasos orbitales están muy separados no es posible crear una imagen interferométrica, puesto que la información de la fase es muy diferente de una imagen a otra. Entonces las imágenes no forman par interferométrico. Por ello, es necesario escoger bien las imágenes con el propósito de que la separación espacial entre las órbitas (línea de base) esté en el rango de separaciones que permiten formar un interferograma. Para las longitudes de onda utilizadas, el rango de líneas de base adecuadas va desde unos 80 metros a unos 200 metros.

Para generar el interferograma, primero se escoge una de las imágenes complejas como base (imagen de referencia o principal). A continuación, la otra imagen (imagen secundaria) se registra sobre la primera. El registro consiste en encontrar puntos de correspondencia entre las dos imágenes que permitan estimar una transformación polinómica entre ellas. Existen varias técnicas de registro (Gabriel y Goldstein, 1988; Goldstein et al., 1988; Prati y Rocca, 1990). En todas ellas se utiliza un criterio determinado para reconocer los puntos de correspondencia. En nuestro caso, como criterio para el registro, se ha escogido la maximización del módulo de la coherencia compleja entre las señales. Representando las ondas como números complejos, la coherencia compleja se puede expresar como:

$$C(p_i) = \langle S_2(p_i) S_1(p_i)^* \rangle / \langle S_2(p_i) \rangle \langle S_1(p_i) \rangle,$$

donde S_2 y S_1 son las señales complejas retornadas por el punto p_i , $\langle \rangle$ indica el valor esperado y $*$ el complejo conjugado. El módulo de este parámetro, de forma muy similar a la correlación cruzada, indica el grado de similitud entre las dos señales. Así, los puntos de correspondencia entre imágenes SAR complejas serán aquellos que maximicen el módulo de la coherencia compleja.

A continuación, con los puntos obtenidos, se ajusta una transformación polinómica con precisión subpíxel entre las dos imágenes. Finalmente, el interferograma se genera, sobre la imagen de referencia, multiplicando, para cada punto y de forma consistente, su señal compleja conjugada por la señal compleja del punto correspondiente en la imagen secundaria. El valor subpíxel correspondiente a dicho punto se obtiene mediante una interpolación cúbica en la imagen secundaria. La fase de la señal producto para cada punto de la imagen de referencia constituye la imagen de diferencias de fase que nos interesa. Ahora bien, como la fase de un número complejo sólo toma valores únicos en el rango $[-\pi, \pi]$, a partir de la señal producto no es posible calcular el número entero de ciclos de fase. Esta ambigüedad hace que la imagen de diferencias de fase presente franjas de interferencia como consecuencia de los saltos de π que se producen cuando, sobre la imagen, se pasa de un ciclo de fase a otro.

Como las dos imágenes no se captan al mismo tiempo, las señales retornadas pueden ser diferentes, provocando la aparición de ruido en la imagen de diferencias de fase. Se pueden identificar diversas causas que generan degradación en las diferencias de fase. Entre éstas se pueden destacar las siguientes:

- variaciones de perspectiva
- cambios de los materiales del terreno
- ruido de los dispositivos electrónicos
- efectos atmosféricos

El valor máximo del módulo de la coherencia compleja, que se obtiene para cada punto de las imágenes SAR una vez registradas, es un buen estimador de la degradación de la señal y por tanto de la calidad de las diferencias de fase (Prati y Rocca, 1990). Este parámetro es muy similar a la correlación y permite escalar las variaciones entre 1, ausencia de cambios, y 0, variación máxima.

Modelo Geométrico de Formación de Imagen SAR

Otro punto importante en el procesado interferométrico es la utilización de un Modelo de Formación de Imagen SAR (MFIS) para obtener productos interferométricos debidamente georeferenciados. En nuestro caso se ha desarrollado un modelo que es al mismo tiempo sencillo y preciso, en la línea de los modelos geométricos descritos en

los trabajos de Meier et al. (1993), Tannous y Pikeroen (1994) y Castillo et al. (1996). En estos trabajos se discuten ampliamente y en detalle sus requisitos y limitaciones.

Algunos parámetros del modelo no se conocen con precisión y otros simplemente pueden ser desconocidos. Éstos están relacionados con las órbitas y el proceso SAR que se ha aplicado a las imágenes. Para que el MFIS sea lo suficientemente preciso es necesario ajustarlos. Con este fin se realiza un ajuste iterativo de mínimos cuadrados utilizando puntos de control, identificados en las imágenes y en el terreno, y los puntos de correspondencia entre las imágenes del par interferométrico obtenidos en el registro interferométrico (Castillo et al., 1996).

Diferencias de Fase Sistemáticas

A medida que aumenta la distancia del sensor a los diferentes puntos de la superficie de la tierra la diferencia de fase también aumenta, esto causa, por ambigüedad de la fase, que vayan apareciendo franjas de interferencia de forma sistemática en el sentido de las columnas. Estas franjas están moduladas tanto por variaciones de la línea de base (distancia entre las posiciones del sensor cuando observan un mismo punto) como por el relieve de la escena. Si las órbitas no son exactamente paralelas, las variaciones de la línea de base introducen variaciones sistemáticas de la fase también en el sentido de las líneas. Por el contrario, el relieve de la escena observada introduce franjas no sistemáticas. Los métodos de reconstrucción de la fase, descritos en el siguiente apartado, tienen diferente rango de aplicación dependiendo de la complejidad de las franjas. Por lo tanto, para simplificar el siguiente paso del procesado interferométrico, las franjas sistemáticas y las no sistemáticas se tienen que tratar de forma separada.

Utilizando el modelo geométrico ajustado de las imágenes implicadas, la componente sistemática se puede estimar simulando las diferencias de fase que produciría la superficie terrestre si no presentase relieve. A continuación, el interferograma simulado se sustrae del interferograma real. De esta manera se obtiene un interferograma con diferencias de fase no sistemáticas causadas principalmente por el relieve. Pueden existir, sin embargo, otros efectos no predecibles y no modelados, causados por diferentes condiciones atmosféricas en la captación de las imágenes o por otros efectos tales como movimientos o variaciones de la superficie terrestre. Estos efectos pueden ser importantes o despreciables dependiendo de la línea de base y de la separación temporal entre la captación de imágenes.

Reconstrucción de las diferencias de fase

Debido a la ambigüedad existente en el número de ciclos 2 de las diferencias de fase, éstas no se pueden utilizar directamente para extraer información altimétrica. Previamente hay que estimar las diferencias de fase reales mediante una reconstrucción del interferograma. Esta reconstrucción consiste en evaluar, para cada punto del interferograma, el número correspondiente de ciclos enteros de fase. Este proceso es conocido como *phase unwrapping*. La diferencia de fase real entre dos puntos adyacentes de las imágenes depende básicamente de la resolución de las imágenes. Como primera aproximación, el proceso de reconstrucción considera que entre dos puntos adyacentes, el incremento de la diferencia de fase debe ser menor que medio ciclo. Sin embargo, esto no es siempre así y, incluso, una mayor resolución de la imagen no siempre evita la existencia de incrementos mayores. La presencia en la imagen de incrementos de diferencias de fase mayores que medio ciclo se denomina *phase aliasing*. Éste fenómeno dificulta seriamente la reconstrucción de las diferencias de fase. Otras causas que producen *phase aliasing* son las distorsiones geométricas propias de las imágenes obtenidas con sensores SAR.

Actualmente, existen muchos algoritmos bidimensionales de reconstrucción de la fase. Para la realización del proceso interferométrico se han probado e implementado algunos de ellos, ampliamente descritos en la bibliografía existente sobre el tema. Una completa descripción comparativa aparece en el trabajo de Pritt (1997). Los algoritmos implementados en el proceso, aplicables según el tipo de diferencias de fase a tratar, son los siguientes: integración directa, integración con máscaras, integración por crecimiento de regiones y reconstrucción por ajuste de mínimos cuadrados ponderados. Así, se utiliza un método u otro dependiendo de si estamos reconstruyendo diferencias de fase sistemáticas o no sistemáticas y de la presencia de ruido y *phase aliasing*.

Generación de MNEs a partir de las diferencias de fase

Existen diversas técnicas para transformar diferencias de fase en alturas (Gabriel y Goldstein, 1988; Goldstein et al., 1988; Prati y Rocca, 1990). En un primer paso, estas técnicas asumen una aproximación diferencial para la transformación de diferencias de fase en incrementos de altura, que se integran píxel a píxel para generar un MNE para toda la escena observada. En una segunda fase, se aplica una transformación geométrica para generar el MNE en una pro-

yección cartográfica. El método que se ha implementado en el proceso interferométrico que aquí se describe es más directo y preciso (Castillo et al., 1996). Este método parte de un interferograma reconstruido que incluye las contribuciones sistemáticas y no sistemáticas de las diferencias de fase. Utilizando los MFIS de las dos imágenes implicadas, las diferencias de fase del interferograma se transforman directamente en un MNE en una determinada proyección cartográfica.

RESULTADOS SOBRE LA ISLA DECEPCIÓN

Imágenes SAR utilizadas

El primer sensor SAR realmente operativo desde el espacio ha sido el sensor AMI (Active Microwave Instrument) embarcado en el satélite ERS-1 de la ESA lanzado en 1991. Este sensor trabaja en banda C (5,66 cm de longitud de onda) con polarización VV permitiendo una resolución de 25 metros sobre el terreno con un ángulo de incidencia de 20-26 grados.

Aunque los objetivos de este sensor estaban orientados a aplicaciones marinas, rápidamente fue utilizado también para aplicaciones terrestres. Su capacidad de funcionamiento, en cualquier condición atmosférica y de iluminación, permite a estos sensores una alta frecuencia de obtención de imágenes, haciendo posible su utilización para el control de fenómenos naturales. Sólo después del lanzamiento del satélite ERS-1 se empezaron a desarrollar métodos interferométricos capaces de obtener información altimétrica y geofísica. La interferometría SAR también permite la cuantificación de cambios temporales de los materiales del terreno. El periodo de paso del ERS-1 por un mismo punto del terreno es de 35 días. Esta separación temporal es el principal inconveniente para las aplicaciones altimétricas de la interferometría SAR. El lanzamiento del satélite ERS-2 en 1995 propició nuevas posibilidades: el funcionamiento simultáneo de los satélites ERS-1 y ERS-2 permite la adquisición de imágenes con una separación temporal de 1 día.

Los datos de las misiones ERS-1/2 se distribuyen comercialmente y están disponibles desde el principio del programa ERS. La cobertura de la superficie terrestre es casi total, exceptuando los polos y las zonas donde no existen estaciones de recepción. Sobre las Shetland del Sur disponemos de pocas imágenes al no existir, cerca, una estación de recepción permanente. Sin embargo, se han podido captar suficientes imágenes para formar diferentes pares interferométricos. De éstos, como primera aproximación a

un estudio más exhaustivo orientado a obtener información geofísica, se han utilizado imágenes SAR de los satélites ERS-1/2 de las Islas Livingston y Decepción (Fig. 2). El par interferométrico escogido ha sido:

- ERS-1: 11-Feb-1996 04:04:58.679 GMT
Track: 390 Frame: 5895
- ERS-2: 12-Feb-1996 04:04:59.716 GMT
Track: 390 Frame: 5895

Con una línea de base interferométrica de 119 metros.

Base cartográfica utilizada

Como cartografía de referencia se ha utilizado los siguientes mapas:

British Antarctic Territory, South Shetland Islands, Sheet W 62 60 E. 1:200.000 (DOS, 1968), Ortoimagen de la isla Livingston, 1:100.000 (ICC-UB, 1991) y Islas Livingston y Decepción. Escala 1:100.000. (SGE, 1997).

Como referencia altimétrica se ha utilizado el datum geodético local para la Isla Decepción descrito en NIMA (1997).

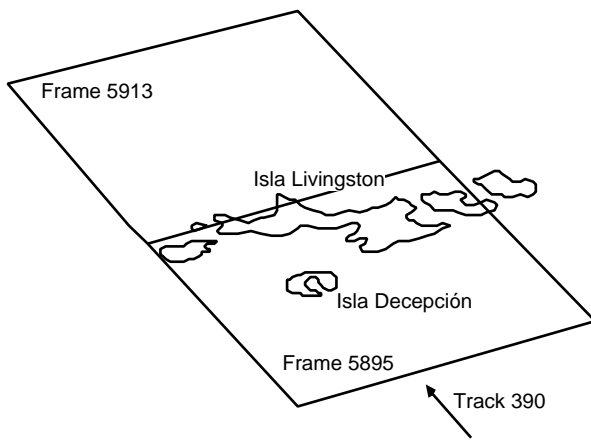


Figura 2: Cobertura ERS del área de interés.

Figure 2: ERS coverage of the interest area.

Proceso Interferométrico

El proceso interferométrico aplicado (Fig. 3) se ha adaptado a las características propias del área de interés y realiza las operaciones que se describen a continuación.

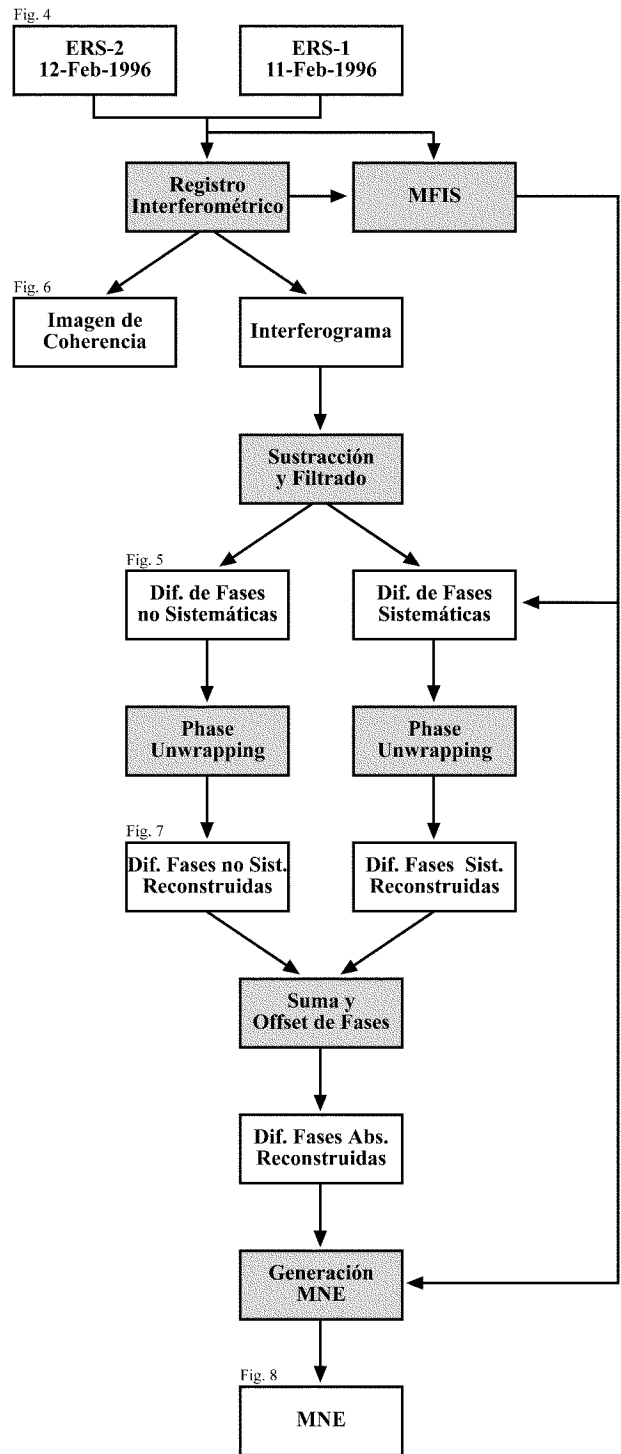


Figura 3: Esquema del proceso interferométrico aplicado a la Isla Decepción.

Figure 3: Diagram of the interferometric process applied to Deception Island.

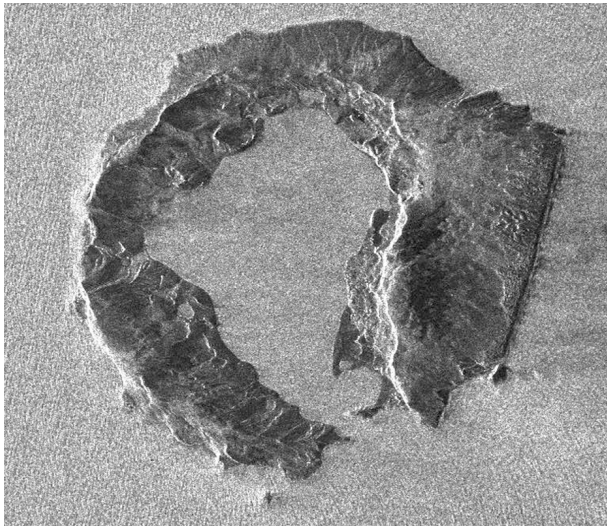


Figura 4: Módulo de la imagen SAR ERS-2 del 12 Feb. 1996

Figure 4: Module of the ERS-2 SAR Image corresponding to 12 Feb. 1996

Determinación del MFIS

Para definir con precisión el MFIS se han buscado puntos de control, identificables en las imágenes y en la cartografía de referencia. A continuación se han registrado las dos imágenes entre sí utilizando como criterio la maximización de la coherencia compleja. De esta manera se ha obtenido una serie de puntos de correspondencia que han permitido definir una transformación polinómica entre las imágenes.

Utilizando los puntos de control y los puntos de correspondencia en un ajuste iterativo múltiple de mínimos cuadrados se han podido determinar con precisión los parámetros críticos del MFIS. Como valores iniciales de los parámetros críticos del modelo (órbita y proceso SAR) se toman los valores aproximados que aparecen en las cabeceras de las imágenes. El error final del ajuste, en coordenadas imagen, es inferior a un píxel.

Registro interferométrico, sustracción de efectos sistemáticos y filtrado

Aplicando la transformación polinómica ajustada con los puntos de correspondencia obtenidos del registro interferométrico se genera el interferograma. En el

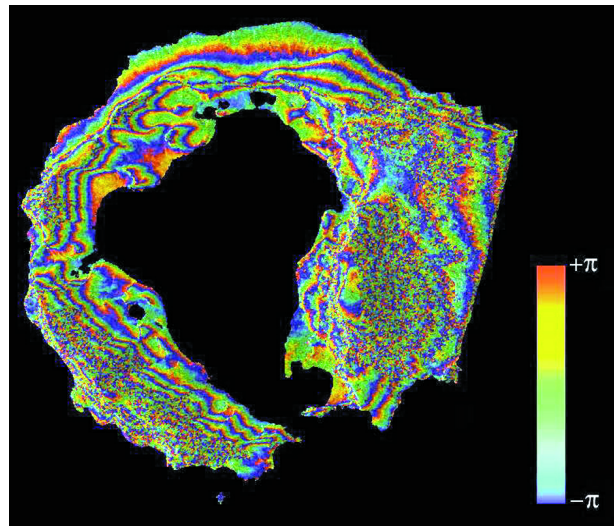


Figura 5: Diferencias de fase no sistemáticas del interferograma 11/12 Feb. 1996

Figure 5: Non-systematic phase differences of the interferogram 11/12 Feb. 1996

caso que nos ocupa se ha utilizado como imagen de referencia la correspondiente al 12 de Febrero (Fig. 4) y como imagen secundaria la del 11 de Febrero. A continuación, se sustraen los efectos sistemáticos en las diferencias de fase para obtener así un interferograma en el que las diferencias de fase estén asociadas a las variaciones altimétricas que queremos derivar. Así, sobre la isla Decepción se obtiene el interferograma que aparece en la figura 5.

En la imagen de coherencia del interferograma (Fig. 6), se pueden observar con claridad las zonas en las que ha habido un cambio sustancial de la señal (baja coherencia). A pesar de que la separación temporal entre las dos imágenes es de sólo un día, la respuesta de las zonas con hielo ha cambiado bastante, debido con toda probabilidad a la variación del contenido de agua del hielo por procesos de fusión, ya que las imágenes corresponden al verano antártico. Esto distorsiona en gran medida las franjas de interferencia que aparecen sobre el hielo, degradando en consecuencia la información altimétrica que de ellas se pueda derivar. Para solventar este problema, las diferencias de fase se mejoran con un filtro adaptativo que se aplica a cada zona del interferograma y que es función del nivel de ruido y de la frecuencia de franjas de interferencia. En la figura 5 aparecen las diferencias de fase sistemáticas ya filtradas.

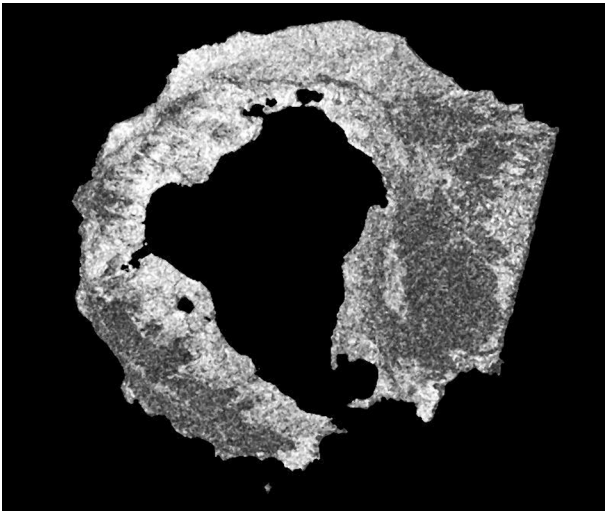


Figura 6: Coherencia del interferograma tandem 11/12 Feb. 1996

Figure 6: Coherence of the tandem interferogram 11/12 Feb. 1996

Reconstrucción de las diferencias de fase

El siguiente paso en el proceso interferométrico es la reconstrucción de la fase. Ésta se ha llevado a cabo aplicando un método por crecimiento de regiones en las zonas con alta coherencia y un método de reconstrucción por mínimos cuadrados en las zonas de coherencia baja.

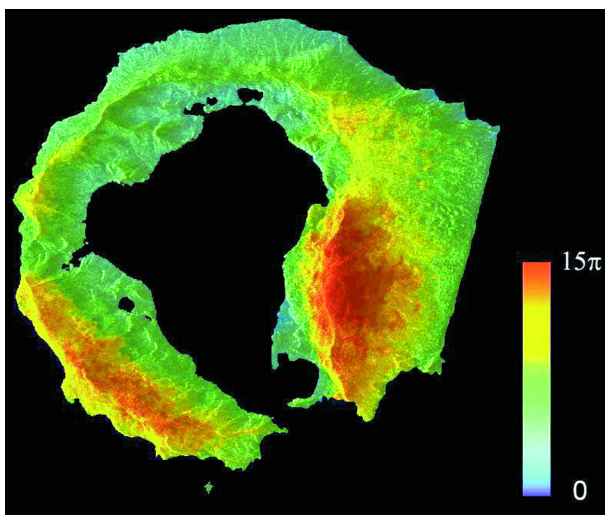


Figura 7: Diferencias de fase no sistemáticas reconstruidas del interferograma 11/12 Feb.1996

Figure 7: Unwrapped non-systematic phase differences of the interferogram 11/12 Feb.1996

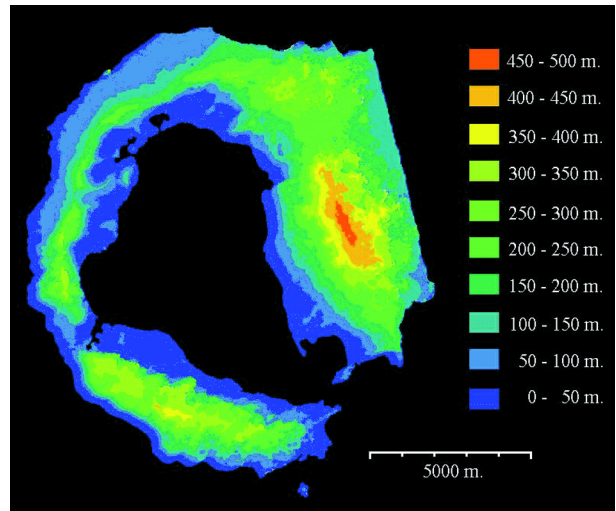


Figura 8: Representación del MNE de la Isla Decepción generado con el interferograma reconstruido. El escalado es de 50 metros para facilitar la comparación con el mapa de referencia.

Figure 8: Representation of the Numerical Elevation Model of Deception Island generated with the unwrapped interferogram. The levels of 50 m. are for comparison purposes with the reference map. The generated NEM has a resolution of 24 meters and is in WGS84 datum and in the same Lambert Conic projection as map ICC-UB (1991).

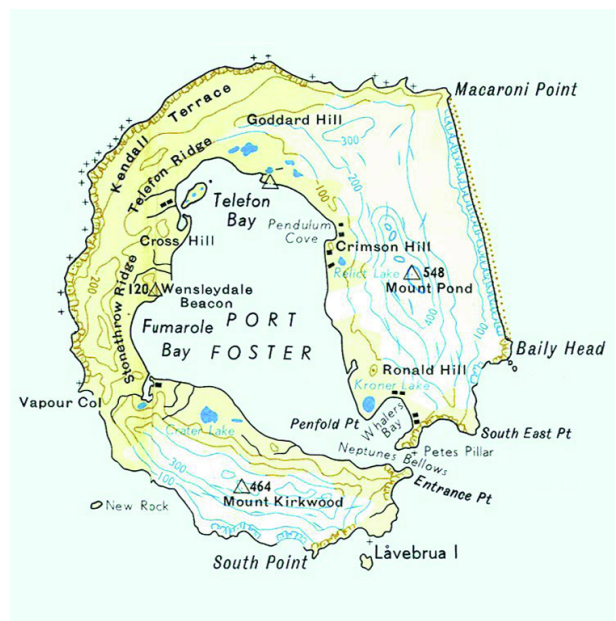


Figura 9: Mapa 1:200.000 de la Isla Decepción, DOS (1968)

Figure 9: 1:200.000 map of Deception Island, DOS (1968)

El resultado es una imagen de diferencias de fase no-sistemáticas reconstruidas relativas a un punto arbitrario del interferograma (Fig. 7). A continuación se reconstruyen las diferencias de fase sistemáticas por un método de integración directa y se suman a las diferencias de fase no sistemáticas ya reconstruidas. Así, se obtiene un interferograma que contiene las diferencias de fase reales necesarias para generar el MNE con el método implementado.

Para generar información altimétrica hay que convertir las diferencias de fase reconstruidas relativas en absolutas. Esto se consigue calculando, para los puntos de control que aparecen en las imágenes, las diferencias de fase absolutas mediante los MFIS previamente ajustados. Con éstas y con los valores de la diferencia de fase relativa asociados a dichos puntos, se deriva un offset en la fase para todo el interferograma reconstruido. A continuación se suma este offset a todo el interferograma y así se obtienen las diferencias de fase reconstruidas y absolutas.

Generación del MNE

El último paso a realizar es la generación de la información altimétrica. Aplicando los MFIS ajustados a las diferencias de fase reconstruidas se genera un Modelo Numérico de Elevaciones para el área de interés. Éste consiste en una malla en una determinada proyección cartográfica para la que se conoce la altura en cada nodo de la malla. Así, para la isla Decepción, se ha generado un MNE en la misma proyección cónica de Lambert que el mapa ICC-UB (1991) con un paso de malla de 24 metros. Se ha utilizado datum WGS84 para que el mapa generado sea útil sobre el terreno utilizando sistemas de posicionamiento global (GPS). Como datum altimétrico se ha utilizado el datum geodésico local para la Isla Decepción descrito en NIMA (1997). En la figura 8 se puede observar una representación del MNE obtenido. Como comparación, en la figura. 9 se puede observar también una reproducción del mapa DOS (1968).

CONCLUSIONES

Se ha generado un MNE de la Isla Decepción y los resultados coinciden bastante bien con la cartografía existente. Al no estar digitalizada ésta, la comparación cuantitativa no es posible. No obstante, a la vista de otros resultados obtenidos con un proceso interferométrico similar (Castillo et al., 1996) es de esperar un error altimétrico medio inferior a 5 metros en las zonas de relieve bajo y superior a 10-25 metros en las zonas de relieve más abrupto. Dichos errores están muy relacionados con las

transformaciones geométricas que se producen durante la generación del MNE. Las pendientes favorables al sensor están fuertemente deformadas por la geometría de observación y generan muchos errores al ser corregidas geoméricamente. Este problema se puede solventar con la utilización de un par interferométrico obtenido con pasadas orbitales descendentes para cambiar el punto de vista intercambiando las distorsiones de las laderas que se producen en órbitas ascendentes.

Otros problemas que generan errores son la pérdida de coherencia por variación del material observado y los efectos atmosféricos causados por diferentes condiciones de propagación entre las diferentes pasadas SAR. Estos errores sólo pueden evitarse con la utilización de imágenes simultáneas o con la utilización de varios pares interferométricos con los que promediar los resultados.

La reconstrucción de la fase es otro punto crítico del procesado interferométrico. Sin embargo, la eficiencia de los métodos de reconstrucción aplicados depende críticamente de la calidad de las diferencias de fase. Las prestaciones de estos métodos mejoran sustancialmente utilizando imágenes simultáneas.

A pesar de las dificultades propias de esta técnica, los resultados obtenidos son esperanzadores de cara a la observación de las propiedades cinemáticas del terreno. Para ello se aplican técnicas de interferometría diferencial que, mediante la utilización de varios pares interferométricos permiten detectar pequeños movimientos. Los algoritmos y resultados de este trabajo constituyen una primera base sobre la que abordar este objetivo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto ANT96-0734 del Plan Nacional de Investigación en la Antártida. En su realización se ha contado con financiación proveniente de la ayuda 1999 SGR-00065 que recibe el Grup de Processos Geodinàmics Superficials de la Universitat de Barcelona (3130-UB-06).

BIBLIOGRAFÍA

Castillo, M., Arbiol, R., Carrasco, D., Broquetes, 1996. Exploitation of SAR interferometry in the Production of Digital Elevation Models. Final Report on ERS SAR interferometry activities. PROJECT A02/E105. European Spatial Agency. April, 1998.

- DOS, 1968. British Antarctic Territory, South Shetland Islands, Sheet W 62 60. Scale 1:200.000. D.O.S. 610 (Series D501). Pub. Directorate of Overseas Surveys.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., 1988. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *Int. J. Remote Sensing*, 9, 857-872.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23, 713-720.
- ICC-UB, 1991. Isla Livingston. Ortoimagen SPOT 1:100.000. Institut Cartogràfic de Catalunya i Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia de la Universitat de Barcelona. 1991.
- Meier, E., Frei, U., Nüesch D., 1993. Precise Terrain Corrected Geocoded Images. In Gunter Schreier (ed.). *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann. 173 pp.
- NIMA, 1997. World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems. National Imagery and Mapping Agency Technical Report 8350.2 Third Edition. USA Department of Defense. July 1997.
- Prati, C., Rocca, F., 1990. Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images. *Int. J. Remote Sensing*, 11, 2215-2235.
- Pritt, M. D., 1997. Comparison of Path-Following and Least-Squares Phase Unwrapping Algorithms. *Proceedings IGARS'97*, 872-874.
- SGE, 1997. Livingston and Deception Islands. Mapa 1:100.000 del Servicio Geográfico del Ejército. Madrid. 1997.
- Tannous, I., Pikeroen, B., 1994. Parametric Modelling of Spaceborne SAR Image Geometry. Application: SeaSat/SPOT Image Registration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60, 755-766.