

Obtención de modelos numéricos de elevaciones con interferometría S.A.R.

M. Castillo y R. Arbiol

Institut Cartogràfic de Catalunya, Balmes 209-211 - 08006 Barcelona.

RESUMEN

Las imágenes SAR obtenidas desde satélite se pueden utilizar para obtener información altimétrica utilizando un método interferométrico. El objetivo de este trabajo es el estudio sistemático de la efectividad de dicho método en la elaboración de modelos numéricos de elevaciones (MNEs). En primer lugar se crean, por simulación sobre un relieve conocido, interferogramas SAR. De esta manera, se dispone de un soporte sobre el que trabajar conociendo de antemano el MNE resultante. Así, se pueden evaluar los errores generados. Una vez elaborados los algoritmos, se aborda un caso real con imágenes SAR obtenidas por el satélite ERS-1. En este artículo, se describe el método, los algoritmos desarrollados y los resultados obtenidos. Como conclusión se observa que la interferometría SAR (INSAR) desde satélite produce resultados esperanzadores de cara a su aplicación futura para obtener MNEs.

PALABRA CLAVE: SAR, ERS-1, interferometría, MNE.

ABSTRACT

Satellite SAR images provide the possibility of obtaining altimetric information using an interferometric method. The objective of this work is the systematic study of the method effectiveness in generating digital elevation models (DEMs). With this purpose, SAR interferograms are created by simulation over an area with known relief, thus providing a test data set where the interferometric process can be tested in order to evaluate the generated errors. After that, algorithms are applied on real SAR images obtained with the ERS-1 satellite. In this paper we present the method, the developed algorithms and the results. In view of these encouraging results we conclude that satellite SAR interferometry (INSAR) could become an important tool in obtaining DEMs.

KEY WORDS: SAR, ERS-1, interferometry, DEM.

INTRODUCCIÓN

Una técnica útil para estudiar cuantitativamente la topografía de una determinada zona es la interferometría con imágenes SAR (INSAR: INterferometría SAR). Se necesitan para ello dos imágenes de una misma escena, tomadas por dos antenas separadas especialmente o por dos observaciones separadas tomadas con una sola antena. En las aplicaciones convencionales de las imágenes SAR sólo se considera el módulo de la onda reflejada, sin embargo éste no contiene información altimétrica. En INSAR, por el contrario, para derivar dicha información se utiliza la fase de la onda y la variación de ésta, bien en múltiples observaciones separadas de la misma escena (desde satélite) o bien en una observación desde una plataforma con dos antenas separadas (desde avión).

La importancia y versatilidad de esta técnica se fundamenta, principalmente, en la funcionalidad del SAR en todo tipo de condiciones meteorológicas y en su autonomía respecto a las fuentes de iluminación naturales. Si además obtenemos las imágenes desde satélite, se beneficia de una gran cobertura sobre la superficie terrestre. De esta

forma, la interferometría SAR, se convierte en una herramienta idónea para el estudio de la topografía de zonas remotas de difícil acceso y observación por medios tradicionales. En cualquier caso, su utilidad más inmediata radica en el estudio topográfico del terreno generando modelos numéricos de elevaciones (MNEs). Estos son el producto clave en cartografía. Existen, además, toda una serie de aplicaciones paralelas de la interferometría SAR: estudio de pequeños movimientos y variaciones del terreno, estudio de corrientes marinas, rectificación de imágenes SAR, etc. En una primera aproximación al tema, nuestro interés se centra en la obtención de MNEs. Nuestra estrategia se basa en desarrollar 100 algoritmos en condiciones en las cuales controlamos todos los parámetros, para asegurar en la medida de lo posible su funcionamiento óptimo. Para ello, creamos, por simulación sobre un relieve conocido, interferogramas SAR, con el fin de tener un soporte sobre el que trabajar conociendo de antemano el MNE resultante y poder evaluar así los errores generados. Trabajamos con dos simulaciones: una directa y sin

ruido, y otra obtenida a través de un simulador SAR con generación de ruido. Una vez elaborados los algoritmos a aplicar, abordamos un caso real. En éste utilizamos imágenes SAR obtenidas por el satélite ERS-1.

INTERFEROMETRIA S.A.R.

Obtención de las diferencias de fase

Sean dos sistemas SAR, moviéndose a lo largo de órbitas (Zebker y Goldstein, 1985) o convergentes (Gabriel y Goldstein, 1988), que observan la misma escena. Considérese el plano ortogonal a las órbitas que contiene los reflectores y los satélites en la posición de referencia (figura 1).

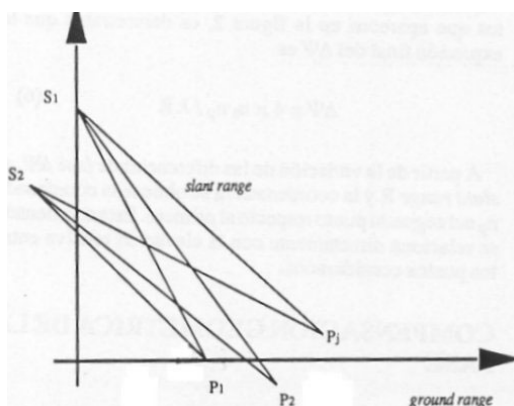


Figura 1. Geometría de la observación

Sean S_1 y S_2 las posiciones de los dos satélites, P_j las posiciones de los puntos reflectores sobre el terreno. Sea ϕ_{ij} la fase de la onda de retorno del punto P_j medida en el satélite S_i . De esta forma, la diferencia entre las fases medidas en los dos satélites, es para el punto P_j :

$$\Psi_j = \Phi_{2j} - \Phi_{1j} = 4\pi (\overline{S_2 P_j} - \overline{S_1 P_j}) / \lambda \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda de la onda emitida y $\overline{S_i P_j}$ la distancia entre el punto P_j y el satélite S_i . Expresando las ondas implicadas en notación compleja, sean $F_1(P_j)$ y $F_2(P_j)$ imágenes SAR complejas del mismo punto P_j , observado por los satélites S_1 y S_2 respectivamente, la imagen compleja compuesta es:

$$F_3(P_j) = F_1(P_j) F_2^*(P_j) = |F_1(P_j)| |F_2(P_j)| \exp(j\Psi_j) \quad (2)$$

donde la fase de la imagen compleja es Ψ_j

REGISTRO DEL INTERFEROGRAMA

Coherencia compleja

Como las imágenes SAR consideradas no son simultáneas, entre las diferentes tomas de imagen

existir variaciones de la escena. Estas acontecen por las siguientes causas:

1. Decorrelación entre las imágenes por cambios de perspectiva.
2. Cambio de posición y/o propiedades físicas de los reflectores dentro de cada elemento de resolución.
3. Ruido aditivo asociado a los dispositivos electrónicos.
4. Efectos atmosféricos.

Para medir cuantitativamente dichos cambios se introduce la coherencia compleja como:

$$\gamma = E(S_1 S_2^*) / (E(|S_1|^2) E(|S_2|^2))^{1/2} \quad (3)$$

donde $E[.]$ indica el valor esperado y $*$ el complejo conjugado. El módulo de la coherencia compleja variará entre 0 (incoherencia) y 1 (ausencia de cambios).

Se puede corregir el cambio de perspectiva adaptando el muestreo (*sampling*) de una de las imágenes a la otra. Las otras causas que provocan cambios entre las imágenes no se pueden corregir y darán lugar a un valor determinado para la coherencia. Otro efecto que produce cambios en la coherencia, es el registro interferométrico, que consiste en establecer una correspondencia entre los puntos de una imagen y los de la otra para poder deformar geoméricamente una de ellas y superponerla a la otra, para calcular las diferencias de fase y crear así un interferograma. Cuanto mejor es el registro mayor es la coherencia y cuando el registro es óptimo, se tiene el valor máximo de coherencia. Por tanto, es posible utilizar la coherencia compleja como criterio para llevar a cabo el registro interferométrico.

Interferogramas simulados

A fin de elaborar los algoritmos necesarios con el máximo de garantías de funcionamiento, se realiza simulación de la imagen de interferencia que se obtiene sobre un relieve conocido. Se utiliza para ello un MNE conocido en una zona concreta. En el caso estudiado, se trata de un MNE de una zona del *Empordá* (Catalunya), con una resolución de 15 m. x 15 m., elaborado en el ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya). En un primer momento, se lleva a cabo una simulación directa. En ésta, para cada punto del MNE, se calcula la diferencia de fase que se obtendría con dos vuelos ficticios de un satélite con las características del ERS-1, en órbitas paralelas en dirección Norte-Sur y con iluminación hacia el Este. La imagen interferométrica que se obtiene está en la misma geometría que el MNE. Dado que en la simulación no se consideran ni las propiedades del sistema de ob-

servación ni las de la superficie estudiada, es la imagen interferométrica no aparece ruido derivado de dichas propiedades.

Otra simulación con las mismas características que la anterior, en cuanto a la realización del vuelo y a los parámetros del ERS-1, es la realizada sobre el mismo MNE por el Dr. Farina con el simulador de imágenes SAR desarrollado en ALEMANIA (Vinelli et al, 1989). En esta simulación sí se tienen en cuenta las propiedades de la superficie estudiada. En la simulación también se introduce ruido, emulando el *speckle* que aparece en las imágenes reales. A la vista de lo descrito es obvio que se trata de una simulación que las reproduce de forma radiométricamente verosímil. El riesgo interferométrico, en este caso es directo ya que se conoce con precisión la correspondencia entre los puntos de las diferentes imágenes.

Inteferogramas reales

Cuando se trabaja con imágenes reales, el registro interferométrico se convierte en un procedimiento crítico para obtener el interferograma óptimo. Existen diferentes métodos para llevarlo a cabo. En nuestro caso, a la vista de las propiedades de la coherencia compleja, se ha preferido utilizar ésta para realizar el registro interferométrico. Con una red uniforme de puntos sobre una imagen y buscándola en la otra imagen, utilizando como criterio el módulo de la coherencia compleja, es posible obtener la transformación afin entre los puntos de las dos imágenes consideradas. Así, para cada par de puntos, se calcula la diferencia de fase asociada. Como caso real, se utiliza un par interferométrico tomado por el satélite ERS-1 sobre un área de Cerdeña (Gennargentu). A fin de conservar en lo posible la coherencia entre imágenes, la separación temporal entre las dos observaciones es de tres días.

Relación entre las diferencias de fase y la elevación del terreno

Considérese la figura 2. En ésta aparece la dirección de *slant range* de una posición del satélite respecto al primer punto difusor y la dirección perpendicular a la misma, en el plano que define el nadir y el *slant range*.

Se puede tomar un sistema de referencia centrado en el primer satélite con los ejes en la dirección de *slant range* y su normal tal y como aparece en la figura. Así, las coordenadas del punto difusor y la segunda posición del satélite son:

$$P: [(R-r_p), n_p] \text{ y } S_2: [r_s, n_s]$$

donde r_p , n_p y n_s , son las coordenadas, en el nuevo sistema, del punto difusor y del satélite 2, y R es el *slant range* desde el satélite 1 hasta donde intersecta el *slant range* con el *ground range*. En este sistema de coordenadas, una aproximación

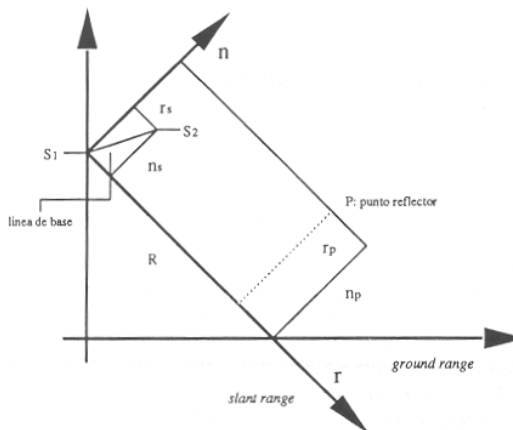


Figura 2.- Sistema de referencia centrado en el satélite 1.

usual para expresar la diferencia de fase del campo electromagnético difundido, medido por dos satélites posicionados respectivamente en $(0,0)$ y (r_s, n_s) viene dada por la siguiente expresión:

$$\Psi = \delta\Phi(r_p, r_s, n_p, n_s) / \delta n_s |_{r_s=n_s=0} n_s + \delta\Phi(r_p, r_s, n_p, n_s) / \delta r_s |_{r_s=n_s=0} r_s \tag{4}$$

La variación de la diferencia de fase respecto a la posición del punto difusor puede expresarse como:

$$\Delta\Psi = \delta\Psi(r_p, r_s, n_p, n_s) / \delta n_p |_{r_p=n_p=0} n_p + \delta\Psi(r_p, r_s, n_p, n_s) / \delta r_p |_{r_p=n_p=0} r_p \tag{5}$$

Desarrollando las anteriores expresiones con los elementos que aparecen en la figura 2, es demostrable que la expresión final del $\Delta\Psi$ es:

$$\Delta\Psi = 4 \pi n_s n_p / \lambda R \tag{6}$$

A partir de la variación de las diferencias de fase $\Delta\Psi$, el *slant range* R y la coordenada n_s se obtiene la coordenada n_p del segundo punto respecto al primero. Esta coordenada se relaciona directamente con la elevación relativa entre los puntos considerados.

COMPENSACION GEOMETRICA DE LA FASE

Compensaciones geométricas

Las franjas que aparecen en el interferograma son debidas a que, a medida que los elementos reflectores de la escena se alejan en *slant range*, las diferencias de fase aumentan de forma sistemática. Esto causa, que vayan apareciendo franjas debido a la ambigüedad de la fase. Su aparición no es del todo regular dado que está modulada por las variaciones de la línea de base (distancia entre las posiciones desde las que el satélite observa un mismo punto) y de la escena observada. Las varia-

ciones de la línea de base introducen un efecto sistemático en las diferencias de fase dependiendo de si las trayectorias desde las que se toman las imágenes son paralelas o no (Gabriel y Goldstein, 1988). Sólo interesan los efectos no sistemáticos, en particular el introducido por el relieve. Por lo tanto, es necesario eliminar los efectos sistemáticos. Si se considera que las trayectorias del satélite son paralelas, el único efecto sistemático a eliminar es el debido a la variación de *slant range*. Como sólo interesa conservar las diferencias de fase producidas por la superficie observada, hay que sustraer el efecto que introduce una superficie de referencia sin relieve, al variar sobre ella el *slant range*. Así, una vez completado el proceso de obtención del MNE se obtienen las elevaciones respecto a la superficie considerada.

Compensación de la contribución del terreno plano

En primera aproximación, como superficie de referencia para realizar la compensación geométrica se puede tomar un plano. La diferencia de fase $\Delta\Psi_F$, relativa al terreno plano, que es necesario sustraer, viene dada por:

$$\Delta\Psi_F = 4\pi n_s (R - R_0) / \lambda R_0 \tan \alpha \quad (7)$$

donde R_0 es el *range* de referencia correspondiente a la primera línea de la imagen y α es el ángulo de la visual respecto al nadir (*off-nadir angle*). Para sustraer dicha fase se multiplica la expresión (2) por la siguiente exponencial compleja en la dirección de *slant range*:

$$\exp(-j\Delta\Psi_F) \quad (8)$$

Después de realizar la compensación la fase de la imagen compleja resultante es $\Delta\Psi_C$. Es demostrable que ésta se relaciona con la altura relativa h de la siguiente forma:

$$\Delta\Psi_C = 4\pi n_s h / \lambda R_0 \sin \alpha \quad (9)$$

De esta forma, se obtienen las alturas relativas al nivel marcado por el *slant range* de referencia de la primera línea del interferograma. Una vez realizada esta compensación, se obtiene un interferograma donde las franjas son causadas principalmente por el relieve (figura 3 y 4).

Otras compensaciones geométricas

Si las imágenes cubren grandes zonas de la superficie terrestre, el efecto de la curvatura de la tierra no es despreciable, y como superficie de referencia no es suficiente considerar un plano en la compensación. En primera aproximación al efecto de la curvatura, es posible sustraer el efecto que produce una superficie esférica. De forma más

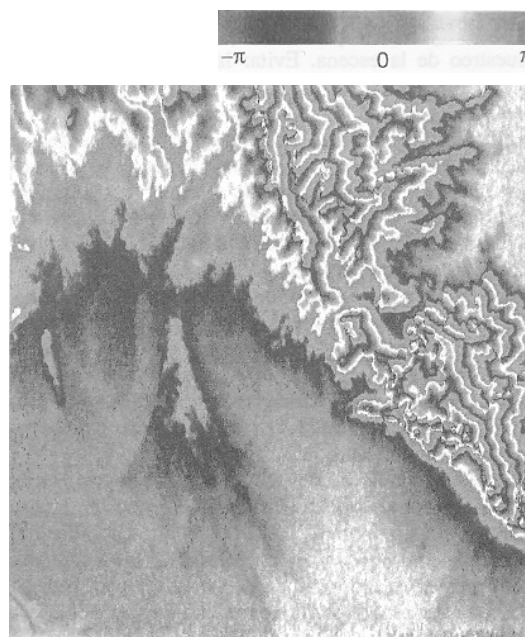
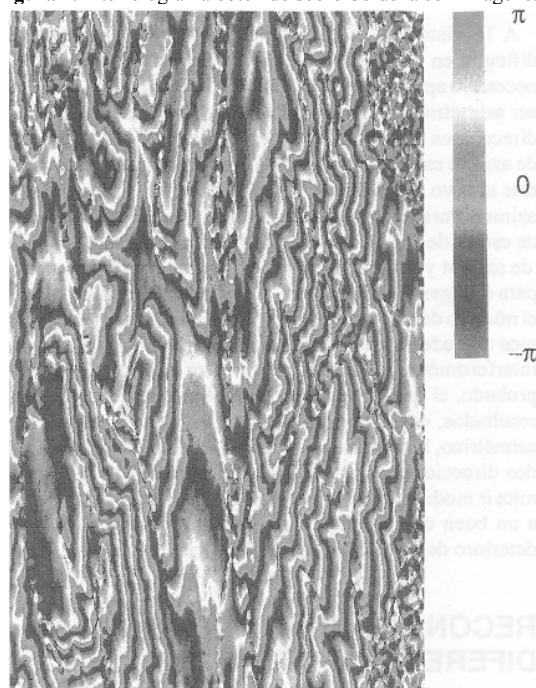


Figura 3. Interferograma obtenido con la simulación de ALENIA sobre Cataluña. La línea de base es de 168 m

Figura 4. Interferograma obtenido sobre Cerdeña con Imágenes



ERS-1. La línea de base es de 139 m

estricta, se puede adoptar como superficie de referencia el elipsoide o el geoide de la zona observada. Este caso es muy complicado y no se tratará en este trabajo. Otra compensación geométrica a considerar, utiliza como superficie de referencia un MNE, sustrayendo el interferograma que produce. Si el MNE de referencia es de baja calidad, en el interferograma aparecen franjas que nos dan idea de las correcciones a aplicar para mejorarlo. Si el MNE es de muy buena calidad, en el interferograma solo aparece información sobre el cambio temporal que presenta la escena observada.

Estimación de los parámetros de la compensación

La mayoría de los parámetros que aparecen en la compensación son conocidos en función de las características del SAR que ha producido las imágenes. No obstante, aparece un parámetro crítico n_s . Véase como ejemplo la expresión (7) que corresponde al caso de la compensación del terreno plano. El parámetro n_s es la línea de base sobre la perpendicular al vector de *slant range* en un punto determinado. Se convierte así en un parámetro vital e imprescindible para realizar la compensación, tanto si ésta implica cambios de la línea de base como si no. Se puede obtener una estimación aceptable del valor de n_s estudiando el periodo de repetición de las franjas en *slant range* (ΔR) en zonas lo más planas posible, sobre el mismo interferograma o con la ayuda de transformadas de Fourier (Gabriel y Goldstein, 1988; Prati y Rocca, 1990). Con ΔR y a partir de la expresión (7) se deduce que:

$$n_s = \lambda h_0 \tan \alpha / 2\Delta R \quad (10)$$

Este método tiene el inconveniente de localizar alguna zona plana. Otro método alternativo utiliza los datos orbitales del satélite. Una vez realizado el registro de las imágenes se conoce la correspondencia entre los puntos de la misma. Como se conoce cuando se ha observado cada imagen, utilizando los datos orbitales se obtiene la posición del satélite durante las dos observaciones y con ella la línea de base y n_s .

Filtrado de interferogramas

A la vista del ruido existente en las imágenes, que dificulta en exceso el tratamiento del interferograma, es necesario aplicar algún tipo de filtro. El filtro a aplicar debe ser asimétrico ya que la escala (*sampling rate*) en las dos direcciones de las imágenes es diferente. En la dirección de azimut es menor que en la dirección de *slant range*. Por este motivo el filtro debe ser más ancho en la dirección de azimut. Para el caso real considerado, se utiliza un factor de escala de 4:1, que es la relación entre los *sampling rate* de azimut y *slant range*. Otro criterio que se ha impuesto para escoger el tipo de filtro, es que reduzca lo más posible el número de punto singulares (residuos, de los que trataremos más adelante) sin deteriorar excesivamente la imagen interferométrica. Entre los diferentes filtros que se han probado, el que parece ser más óptimo, a la vista de los resultados, es el filtro gaussiano. Dado que tiene que ser asimétrico, la anchura de la gaussiana será diferente en las dos direcciones según el factor de escala. Este filtro permite ir modificando la anchura de la gaussiana hasta llegar a un buen compromiso entre la reducción de ruido y el deterioro de las franjas de interferencia.

RECONSTRUCCION DE LAS DIFERENCIAS DE FASE

Valores principales de la fase

Debido a la existencia de ambigüedad en la obtención de la diferencia de fase, hay que reconstruirla para obtener el número de ciclos 2π . Al valor de la fase con ambigüedad lo denominamos valor principal de la fase. Para obtener los valores reales de las diferencias de fase de forma relativa, partimos de un punto arbitrario de la imagen (Prati y Rocca, 1990) y con él obtenemos los valores asociados a los puntos de toda la imagen. El MNE al que darán lugar es relativo al punto considerado como origen. El procedimiento de los valores reales a partir de los valores principales es conocido como *phase unwrapping*. Para obtener el valor real de la diferencia de fase asociada a los píxeles adyacentes, se considera que la imagen está lo suficientemente muestreada para quede un píxel a otro la diferencia de fase varíe menos que medio ciclo en valor absoluto pero las imágenes nunca están lo suficientemente muestreadas para evitar que pueda haber saltos mayores. A este fenómeno se le denomina *phase aliasing*.

ALGORITMOS DE PLASE UNWRAPPING BIDIMENSIONAL

Integración de las diferencias de fase

Consideración que entre píxeles adyacentes las diferencias de fase no pueden ser mayores que π en valor absoluto. La diferencia de fase real del punto i respecto al punto j , S_{ij} , puede ser definida como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Si } |\Delta\Psi_{ij}| < \pi & \dots\dots\dots S_{ij} = \Delta\Psi_{ij} \\ \text{Si } \Delta\Psi_{ij} \leq -\pi & \dots\dots\dots S_{ij} = \Delta\Psi_{ij} + 2\pi \\ \text{Si } \Delta\Psi_{ij} \geq \pi & \dots\dots\dots S_{ij} = \Delta\Psi_{ij} - 2\pi \end{aligned}$$

A partir de un determinado punto, integrándolas diferencias de fase reales a lo largo de un camino de integración arbitrario, vamos obteniendo para las diferencias de fase, los valores reales relativos al punto en el que comenzamos la integración. Extendiendo el procedimiento a toda la imagen calculamos los valores reales de las diferencias de fase para todos los puntos. Ahora bien, si el camino de integración atraviesa una zona que presenta *phase aliasing*, se propaga error a los puntos que tratemos posteriormente.

Residuos y líneas de discontinuidad

A los lugares donde aparece *phase aliasing* se les denominarán discontinuidades. Estas aparecen por los efectos que el SAR introduce (*layover*, *shadowing*) y por zonas del relieve en las que se verifica la consideración entre píxeles adyacentes, por su naturaleza abrupta y/o por el muestreo de la

escena. Evitar la propagación de error implica evitar estas zonas así, localizando las zonas problemáticas y evitándolas durante la integración a lo largo del camino adecuado se llega a la reconstrucción óptima. Para ello, primero se eliminan de la integración los puntos en los cuales la relación señal-ruido es muy baja, que normalmente están asociadas a zonas de sombra o a zonas afectadas de *speckle*, y por tanto, con valores de la diferencia de fase afectados de error. A continuación, se buscan las zonas donde existen discontinuidades integrando diferencias de fase a lo largo de caminos de integración cerrados. Para hacerla de la forma más exhaustiva, los caminos de integración deben ser lo más pequeños posibles. En éstos el resultado de la integración (el residuo) debe ser nulo. Si el resultado es diferente de cero el Camino de integración atraviesa una discontinuidad, y en el proceso de reconstrucción de la fase se propaga error.

Algunos casos de discontinuidades serán imposibles de localizar y será mejor aislar totalmente la zona en que se presentan y evitarla durante la integración. Un indicador claro de la complejidad de una zona de discontinuidades es la densidad de residuos: si ésta es muy elevada se aísla la zona. Por tanto los residuos son imprescindibles como trazadores de discontinuidades. Estos aparecen porque, al calcularlos, se atraviesa una discontinuidad un número impar de veces. Si se unen los residuos más próximos entre sí con líneas (*ghost fines*), en principio se tienen localizadas las discontinuidades (método de mínima distancia: Goldstein y col., 1988). Así se obtiene una solución al problema de las discontinuidades. Pero hay más soluciones posibles. Por ello son necesarios otros trazadores accesorios. Se han probado como trazadores, gradientes y laplacianos de las diferencias de fase, la amplitud de la señal (Prati y col., 1990) y la coherencia compleja, por estar todos ellos asociados a alguna característica relacionada con el *phase aliasing*. El trazador que mejor resultado ha producido, ha sido la coherencia compleja debido a que las discontinuidades están claramente asociadas a zonas de muy baja coherencia, ya sea por mal muestreo del terreno o por fuertes variaciones del mismo.

Identificación de las líneas de discontinuidad: Trazado automático, asistido y semiautomático

Como ya se ha indicado, en la identificación de las discontinuidades se consideran simultáneamente los residuos e información de la coherencia compleja como trazadores de las zonas problemáticas. También, de forma complementaria, se utiliza la amplitud o los gradientes de las diferencias de fase. Afín de tratar toda esta información se implementa de forma automática a localización de las líneas de discontinuidad. Ahora bien, el trazado

automático es difícil de llevar a cabo de forma satisfactoria cuando existen discontinuidades complicadas o zonas con *layover* o sombras. Así, quedan descartadas grandes áreas de la imagen y muchas discontinuidades escapan a su identificación. Con estas limitaciones, se ha realizado el *phase unwrapping* del interferograma simulado en ALENIA con resultados moderadamente satisfactorios. Para el caso real de la imagen ERS-1 sobre Cerdeña, no se ha conseguido realizar la reconstrucción de las diferencias de fase, debido a la gran presencia de *layover*. Este hace que la identificación automática de las discontinuidades descarte zonas que impiden la reconstrucción de todo el interferograma considerado.

Una alternativa a la identificación automática, consiste en el trazado manual o asistido. En la identificación asistida se trazan las diferentes discontinuidades a partir de los residuos y sobre los trazadores considerados. Para eludir los efectos del ruido y la complejidad de las discontinuidades utilizamos un trazador u otro según convenga. Una vez realizada la reconstrucción de las diferencias de fase, interactivamente, se observa si alguna discontinuidad ha escapado a su identificación y, en tal caso, se corrigen las discontinuidades trazadas hasta que todas han sido identificadas. Así, para el interferograma simulado en ALENIA, las discontinuidades que se obtienen presentan prácticamente la misma distribución que en la simulación directa (figura 5).

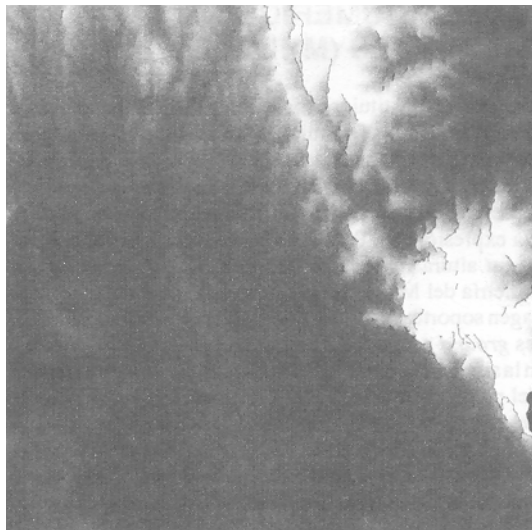


Figura 5.-. Imagen de diferencias de fase reconstruidas sobre el interferograma de la figura 3. Las discontinuidades se han trazado de forma asistida.

Para el caso real considerado, se llega a una determinación muy buena de las discontinuidades presentes, y se realiza la reconstrucción de las diferencias de fase sin problemas (figura 6). Obviamente, el trazado asistido de las discontinuidades es muy costoso en tiempo, sobre todo para escenas muy grandes, pero es eficiente en lo que respecta a los resultados. Una optimización del

mismo, en primera aproximación, consiste en lo siguiente: primero trazamos de forma automática las discontinuidades simples, que en casos donde el relieve no es extremadamente abrupto son muy abundantes y, posteriormente, de forma interactiva, trazamos las discontinuidades más complejas o unimos las discontinuidades simples entre sí para aislar las zonas problemáticas. Tenemos de esta forma un trazado semiautomático.

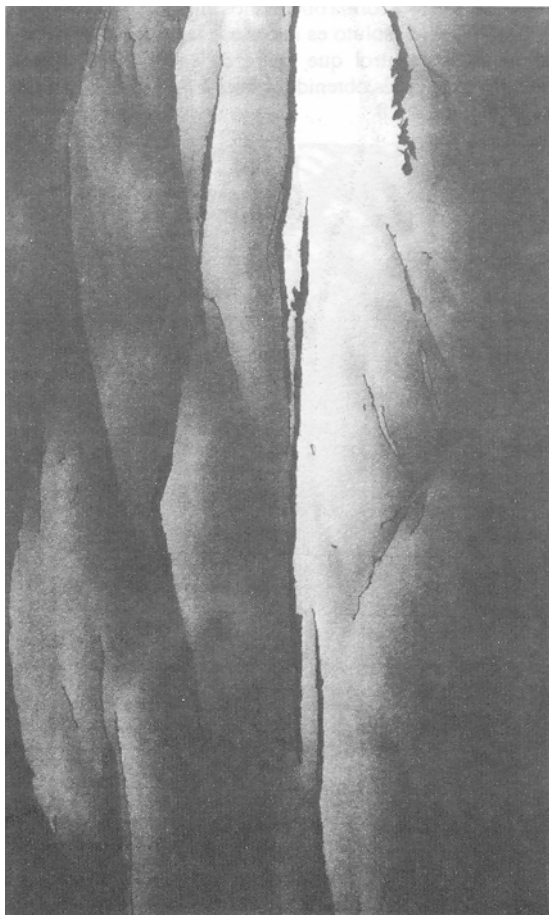


Figura 6.- Imagen de diferencias de fase reconstruidas sobre el Interferograma de la figura 4. Las discontinuidades se han trazado de forma asistida.

MODELO NUMERICO DE LEVACIONES (MNE)

Una vez reconstituidos los valores de las diferencias de fase, aplicamos las fórmulas diferentes ya descritas para obtener las elevaciones del terreno sobre la superficie de referencia compensada. En el caso en el que la superficie de referencia es un plano, las alturas relativas se obtiene de la expresión (9). Para cada punto de la imagen obtenemos su altura respecto a la altura del primer píxel. La geometría del MNE así obtenido es la misma que la de la imagen soporte; es decir, está en *slant range*. Para obtenerla es *ground range* realizamos una corrección geométrica con la siguiente transformación: a partir de la altura relativa h del punto considerado, del *slant range* de referencia R_0 y del

ángulo α , que aparecen en la expresión (9), obtenemos la coordenada x en *ground range* (distancia sobre el plano entre el punto y el nadir del satélite que ha tomado la imagen soporte) con la expresión siguiente:

$$x = (R^2 - R_0^2 \sin^2 \alpha - h^2 + R_0 h \sin \alpha)^{1/2} \quad (11)$$

A continuación se reordena cada punto según su coordenada x y con los valores obtenidos, construimos una malla uniforme. De esta forma obtenemos un MNE relativo. Para convertirlo en absoluto es necesario la altura absoluta de un punto de control que aparezca en el MNE. Como ejemplos de MNEs obtenidos obsérvese los que aparecen en las figuras 7 y 8.

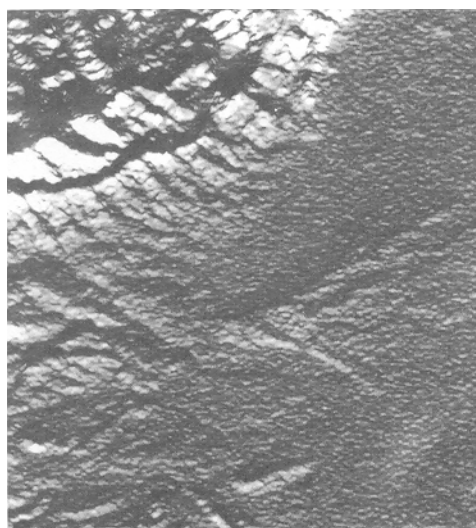


Figura 7.- Mapa de pendientes del MNE obtenido a partir de la figura 5



Figura 8.- Mapa de pendientes del MNE obtenido a partir de la figura 6.

EVALUACION DE ERRORES

Para evaluar el error que cometemos en la determinación de las elevaciones del terreno debemos comparar los MNEs calculados por otros medios. Por ahora, los modelos que obtenemos están corregidos geoméricamente de las deformaciones que introduce el SAR pero no están referenciados en una proyección cartográfica. Por tanto, cada punto del MNE calculado se tiene que identificar por correlación con su correspondiente en el modelo de referencia, para estimar los errores cometidos.

Como los MNEs obtenidos, son relativos a un punto arbitrario de los mismos y el de referencia contiene los valores absolutos de las elevaciones, primero se tiene que calcular el desnivel medio entre ellos. Con el desnivel medio se calcula la desviación típica de las diferencias como estimación del error medio cometido. Esto se lleva a cabo para los diferentes MNEs para los que conocemos el modelo de referencia. Para el caso real esto no es posible. También se calculan los mapas de diferencias punto a punto, que aparecen en la figura 9. A la vista de estos mapas y de los errores estimados se pueden apuntar las siguientes observaciones. En todos los casos el error medio está fuertemente asociado a la presencia de relieve abrupto. Si sólo se tiene en cuenta, en la evaluación del error medio, zonas con relieve suave, el error se reduce apreciablemente. En la figura 9 se puede apreciar que las zonas que presentan mayores diferencias son aquellas que corresponden a las vertientes favorables a la iluminación del radar, ya que han sufrido una compresión en *slant range*. La mayor parte del error se produce en estas vertientes durante la corrección geométrica. En el caso de la simulación directa, como el interferograma carece de ruido, obtenemos una estimación de los errores asociados al método de obtención del MNE. En el mapa de diferencias A, se puede apreciar que las diferencias son muy bajas, y se concentran en las vertientes favorables a la iluminación. En el caso de la simulación realizada en ALENIA, en los mapas B y C, el interferograma presenta mucho ruido que ha sobrevivido al filtrado. Este ruido, unido a una imperfecta determinación de las discontinuidades, hace que los errores medios se incrementen de forma apreciable respecto a los obtenidos en la simulación directa. En ambos mapas, se observa que las máximas diferencias se dan en las vertientes favorables a la iluminación y en las zonas de mayor relieve, donde es vital la óptima determinación de las discontinuidades. También se observa, sobre todo en las zonas de relieve suave, que muchas de las diferencias están fuertemente asociadas al ruido. En el mapa B las discontinuidades se han localizado de forma automática y en el mapa C de forma asistida. En este último caso las zonas con discontinuidades presentan mejores resultados.

CONCLUSIONES

Los errores obtenidos en la simulación más verosímil (la realizada en ALEMANIA) y en el caso más óptimo (determinación asistida de las discontinuidades) son más elevados que los calculados con interferometría SAR desde avión (Gray y col., 1992). En nuestro caso, se obtiene errores del orden de 5m. en zonas con relieve suave y del orden de 10-25 m. en zonas con relieve abrupto, tal y como se puede observar en el correspondiente mapa de diferencias. Esto es debido a la diferencia

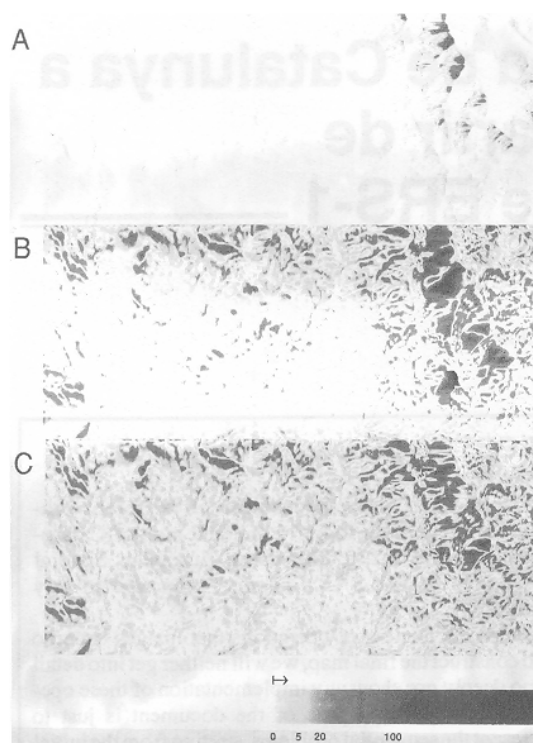


Figura 9.- Mapas de diferencias entre los MNEs obtenidos y el de referencia. A: Simulación directa. B: Simulación ALENIA con trazado de discontinuidades automático. C: Simulación ALENIA con trazado de discontinuidades asistido.

de resolución de las imágenes obtenidas desde satélite respecto de las obtenidas desde avión. Estas últimas presentan menos *phase aliasing* ya que realizan un mayor muestreo de la escena. En la interferometría SAR desde satélite se consigue una mayor cobertura en detrimento de la resolución de los MNEs.

El error manifiesta una fuerte dependencia de la corrección geométrica al pasar de *slant range* a *range*. Las vertientes favorables a la iluminación no dan buenos resultados. Esto se puede evitar con MNEs obtenidos sobre la misma zona con otra iluminación. Se pueden utilizar, por ejemplo, pares interferométricos obtenidos con órbitas ascendentes y pares obtenidos con órbitas descendentes.

El error también manifiesta una fuerte dependencia del ruido presente en el interferograma. Se puede observar que los errores que introduce el *speckle*, efectivamente, son mayores que los límites teóricos descritos por Prati y Rocca (1990). Por ello es necesario mejorar el tipo de filtros a fin de reducir al máximo el ruido sin destruir la información presente en los interferogramas.

La identificación de las discontinuidades debe ser óptima. La aplicación de los diferentes métodos descritos indica que la identificación asistida da mejores resultados que la automática. No obstante, la identificación asistida no es funcional para el tratamiento de imágenes muy grandes. Una primera posibilidad para optimizar la identificación de discontinuidades consiste en llevarla a cabo de forma semiautomática.

Se ha obtenido también un MNE con imágenes SAR reales sobre Cerdeña (Italia). En este caso sólo ha sido efectiva la determinación asistida de las discontinuidades ya que las imágenes implicadas presentaban *layover* y zonas de sombra. La continuación lógica del trabajo realizado consiste en llevar a cabo el cálculo de MNEs con imágenes reales sobre zonas con MNEs conocidos por otros medios para poder evaluar los errores cometidos. Para ello, se dispone de pares interferométricos reales obtenidos por el satélite ERS-1 sobre el delta del Ebro que darán tratados próximamente. Se realizará así un estudio más realista de los errores que se obtienen.

BIBLIOGRAFIA

- GABRIEL, A. K. y GOLDSTEIN, R. M. 1988. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, 2: 857-872.
- GABRIEL, A. K. GOLDSTEIN, R. M. y ZEBKER, H. A. 1989. Mapping small elevations changes over large areas: Differential Radar Interferometry. *Journal Geophysical Research*, 94: 9183-9191.
- GOLDSTEIN, R. M., ZEBKER, H. A. y WERNER, C. L. 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23: 713-720.
- GRAY, A. L., MATTAR, K. E. y FARRIS-MANING, P. J. 1992. Airborne SAR Interferometry for Terrain Elevation, *Proceedings IGARSS92*: 1589-1591.
- PRATI, C., GIANI, M. y LEURATTI, N. 1990. SAR interferometry: a 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute values informations. *Proceedings IGARS90*: 2043-2046.
- PRATI, C. y ROCCA, F. 1990. Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images. *International Journal of Remote Sensing*, 11: 2215-2235.
- VINELLI, F., MORABITO, C., TOMA, M. R. DADO 10, E., FARINA, A. y PANGRAZI, R. 1989. Processing of Spaceborne and Airborne SAR Data: An Experimental Activity. *Intl. Conference on Radar*. pp 301-308.
- ZEBKER, H. A. y GOLDSTEIN, R. M. 1986. Topographic Mapping from interferometric Synthetic Aperture Radar observations. *Journal Geophysical Research*. 91: 4993-4999.