

1° premio al mejor Trabajo Técnico
de las II Jornadas de Geotecnología

Aplicación de modelos digitales de elevación basados en imágenes SAR en el estudio de la geología estructural

Por **Pablo A. Euillades, Leonardo D. Euillades, Mauro H. Blanco, Gabriel A. Cabrera**, CEDIAC-Universidad Nacional de Cuyo y **Jan Witte** y **José Luis Bergamasco**, Wintershall Energía SA

Construcción del modelo digital de elevación

El modelo digital de elevación (MDE) se construyó utilizando la técnica denominada interferometría de imágenes de radar (InSAR).

Interferometría de imágenes de radar

El sensor de radar es activo, que significa que se vale de una fuente de iluminación propia para obtener información del terreno; a diferencia de los sensores pasivos, que se valen de la

energía emitida por el sol y reflejada en la tierra (Lillesand y Kiefer, 1994). Los sensores ópticos y los radiómetros son ejemplos de esta última clase de instrumentos. Esta característica permite una gran versatilidad, ya que es posible modelar la señal emitida de manera de hacer foco en determinadas propiedades de los materiales que de otra manera serían muy difíciles de medir (Ulaby *et al.*, 1986).

Una de las posibilidades que brinda este esquema es la de utilizar iluminación coherente. Esta característica es fundamental para obtener imágenes de radar con buena resolución espacial (radar de apertura sintética), pero además permite aprovechar otra propie-

dad de las señales electromagnéticas: la fase. En el caso de una imagen de radar, cada pixel tiene asociado, entonces, un valor de amplitud y un valor de fase. La amplitud está directamente relacionada con las propiedades eléctricas del terreno. La fase está vinculada, además de con las propiedades del terreno, con la distancia entre el sensor (satélite) y el suelo para cada pixel.

En base a lo dicho, si la altura de vuelo del sensor (satélite) es conocida, sería posible inferir la cota de cada pixel en base a la información de fase de una imagen (Zebker y Goldstein, 1986). Sin embargo, esto no es así por diversas razones: 1) la interacción de la energía EM con el suelo produce cambios de fase *a priori* desconocidos (Li y Goldstein, 1990; Zebker y Villasenor, 1992); 2) como la distancia sensor-tierra es mucho mayor que una longitud de onda, existe una ambigüedad de N ciclos de fase en la información registrada.

Tales inconvenientes pueden superarse mediante la adquisición de un par de imágenes desde posiciones ligeramente diferentes en el espacio. Luego se calcula la diferencia de fase entre las mismas, que previamente se corregieron con una precisión mínima de $1/8$ de píxel (Gens, 1998). Es posible demostrar que esta diferencia de fase está directamente relacionada con los cambios de altitud topográfica, suponiendo que las contribuciones debidas al suelo en sí son idénticas en ambas imágenes y,

por lo tanto, se cancelan (Prati y Rocca, 1988). La ambigüedad de N ciclos de fase se transforma en una ambigüedad de fase interferométrica (es decir, una ambigüedad de diferencias de fase), que es posteriormente resuelta mediante un procedimiento denominado "desenrollado" de fase (*phase unwrapping*; Ghiglia y Pritt, 1998).

Deformación por topografía

El radar de apertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) tiene visión lateral. Esto significa que su antena apunta hacia un costado (y hacia abajo) del avión o satélite que porta el instrumento y es la configuración que permite constituir la imagen a partir de la información de ecos reflejados en el terreno. De esta manera, la imagen de radar es adquirida en un sistema ortogonal de coordenadas cuyos ejes son: 1) dirección de vuelo (Azimuth); y 2) tiempos de tránsito (o distancias recorridas a la velocidad de la luz por los ecos emitidos y reflejados), más conocido como rango inclinado (*slant range*).

Esta configuración introduce serias deformaciones relacionadas con la topografía de la zona que se está ilumina. Los fenómenos que se producen se denominan: 1) acortamiento; 2) inversión; y 3) sombra (Curlander y McDonough, 1991) y se describen brevemente a continuación.

Acortamiento (*foreshortening*): se produce en las laderas que están orientadas hacia la antena de radar al momento de la adquisición de la imagen. Estas laderas aparecen comprimidas en la dirección del rango inclinado, es decir que se representan en la imagen como si fueran más cortas que en el terreno. La figura 1A permite ver por qué se produce esto. El caso límite de este fenómeno se da cuando la pendiente de la ladera es igual al ángulo de visión del radar y consiste en una pendiente representada por una línea de un único pixel de ancho en la imagen. Cuando la pendiente de la ladera en cuestión es mayor al ángulo de visión del radar se produce inversión (*layover*): los ecos provenientes de la cima llegan al radar antes que aquellos que llegan a la base (figura 1B). La ladera aparece invertida (y comprimida) en la imagen.

En los casos de acortamiento e inversión, las laderas comprimidas aparecen como rasgos muy brillantes en la imagen de radar. Esto se debe a que los ecos reflejados por gran cantidad de elementos del terreno llegan a la antena al mismo tiempo, provocando un fenómeno de saturación de la señal.

Las laderas orientadas en dirección opuesta a la antena pueden verse afectadas por sombra: esto ocurre si la pendiente es tan pronunciada que el radar no puede iluminar la ladera. En este caso no hay ecos reflejados provenientes de la zona en sombra y en la imagen sólo puede verse el ruido térmico del sensor (figura 1C).

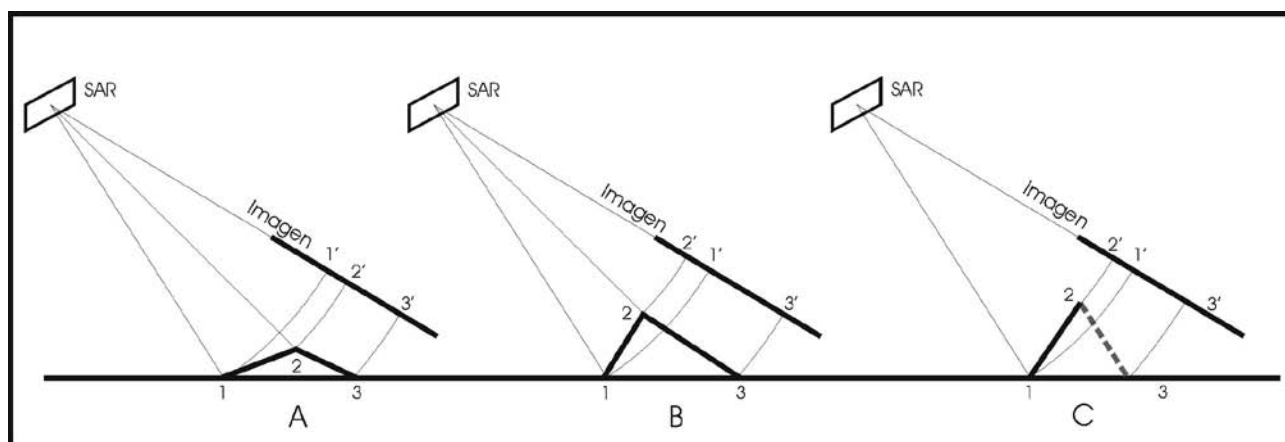


Figura 1. Deformación por topografía en imágenes SAR. A) Acortamiento: a la distancia real 1-2 le corresponde en la imagen una distancia mucho menor 1'-2'. B) Inversión: el segmento de terreno 1-2 aparece en la imagen invertido 2'-1'. C) Sombra: al segmento de terreno 2-3 nunca lo alcanza la iluminación del radar, o sea que en la imagen 1'-3' es ruido térmico del instrumento; 2'-1' de la imagen se debe a un efecto asociado, ya que en el ejemplo hay inversión y sombra.

Coherencia

Para que dos imágenes de radar constituyan un par interferométrico (es decir, para que sirvan para reconstruir topografía mediante dicha técnica) es necesario que cumplan con ciertas condiciones, que brevemente se describen a continuación.

Se expuso anteriormente que las imágenes deben tomarse desde posiciones ligeramente diferentes. Esto significa que existen límites estrechos para las posiciones relativas de las antenas que toman una y otra imagen. No pueden estar exactamente en el mismo punto porque, en tal caso, la sensibilidad a la topografía es nula y no pueden estar demasiado separadas porque la información de fase se vuelve muy ruidosa (decorrelación geométrica). El parámetro que gobierna esto se denomina línea de base, y no es más que la distancia entre las antenas de radar en una y otra adquisición.

Cuando las imágenes se toman al mismo tiempo y con dos antenas montadas en una plataforma aérea u orbital, la línea de base está fija y se conoce con exactitud. En cambio, cuando las imágenes se adquieren desde una plataforma satelital en múltiples pasadas (es decir, en diferentes momentos), la línea de base dependerá de la posición del satélite al momento de realizar la adquisición. En este último caso, la misma debe ser calculada a partir de los parámetros orbitales del satélite.

También en el caso de adquisiciones en tiempos diferentes cobra importancia el fenómeno de decorrelación temporal. El mismo se produce cuando no se cumple la condición de que el cambio de fase atribuible al terreno es igual en ambas adquisiciones. Esto ocurre cuando se han producido cambios importantes a nivel del terreno entre adquisiciones y, lógicamente, tiende a aumentar cuando aumenta el período de tiempo transcurrido entre las mismas.

Además, las zonas de la imagen donde se han producido los fenómenos de acortamiento, inversión o sombra son zonas de decorrelación.

Para caracterizar el fenómeno de decorrelación, independientemente de su causa particular, se utiliza un coeficiente denominado grado de coherencia,

$$\gamma = \frac{|E[S_1 \cdot S_2^*]|}{\sqrt{E[S_1 \cdot S_1^*]E[S_2 \cdot S_2^*]}}$$

donde * significa complejo conjugado y S1 y S2 son consideradas variables aleatorias complejas. E[] representan los promedios en el tiempo de la ocurrencia de un valor en las imágenes.

La coherencia entre dos imágenes toma valores entre 0 y 1. Cuando es igual a 0, las imágenes están totalmente decorrelacionadas, mientras que cuando el valor es 1 están completamente correlacionadas. Este coeficiente puede entenderse como una medida de la confiabilidad de la fase interferométrica que va a utilizarse para reconstruir la topografía.

Datos de origen

Para la construcción del MDE de Ranquil del Norte se utilizaron imágenes de los satélites de radar ERS1 y ERS2, pertenecientes a la Agencia Espacial Europea. Para minimizar los errores por decorrelación temporal se seleccionaron pares interferométricos tomados durante el desarrollo de la misión TANDEM del año 1997. Dicha misión consistió en que ambos satélites (que son idénticos) hicieran adquisiciones con un día de diferencia, minimizando los tiempos intermedios (el modo estándar de adquisición tiene un período de revisita de 35 días).

Además, dado que la zona de interés es muy escarpada, existen numerosos lugares donde se producen los fenómenos de deformación por topografía descritos anteriormente. Para resolver este problema se utilizó un par de imágenes tomado en pasada ascendente del satélite (rumbo sur-

norte) y otro en pasada descendente (rumbo norte-sur). De esta manera, como la antena siempre está orientada hacia la derecha de la trayectoria, esta configuración de adquisición permite observar las laderas desde el oeste y desde el este respectivamente. La figura 2 muestra los datos de las imágenes utilizadas.

Las imágenes fueron enfocadas y luego procesadas con el *software* de interferometría EVInsar, versión 1.2.

Procesamiento interferométrico

El procesamiento interferométrico consta de las siguientes etapas: 1) ingestión de imágenes; 2) corrección; 3) cálculo del interferograma; 4) filtrado del interferograma; 5) desenrollado de fase; 6) pasaje de fase desenrollada a cotas; y 7) geocodificación. En la medida en que cada una de ellas se completa exitosamente es posible comenzar con la siguiente, hasta obtener el producto final, que es el MDE geocodificado.

El proceso descrito se realizó exitosamente con los dos pares interferométricos seleccionados para construir el MDE de Ranquil Norte. Nos detendremos brevemente en la etapa 5 (desenrollado de fase) porque es la clave de la calidad del producto finalmente obtenido.

Cuando se calcula el interferograma (es decir, la diferencia de fase pixel a pixel entre las imágenes que componen el par interferométrico) se obtiene una imagen de fase interferométrica modulada en 2π . Esto significa que los valores varían entre $-\pi$ y π y forman franjas que son la contraparte en fase enrollada (discontinua) de la topografía. Sin embargo, es necesario transformar la fase discontinua en fase conti-

PAR 1 ASCENDENTE

Satélite	Órbita	Centro	Fecha	Nivel de proces.
ERS 1	32771	Lat -37.558 S Lon -73.250 W	21-oct-1997	RAW
ERS 2	13098	Lat -37.562 S Lon -73.252 W	22-oct-1997	RAW

PAR 2 DESCENDENTE

Satélite	Órbita	Centro	Fecha	Nivel de proces.
ERS 1	32520	Lat -37.452 S Lon -66.553 W	03-oct-1997	RAW
ERS 2	12847	Lat -37.436 S Lon -66.551 W	04-oct-1997	RAW

Figura 2. Características de las imágenes de radar utilizadas.

nua para obtener luego una topografía continua; a este proceso se lo denomina desenrollado de fase (*phase unwrapping*). El mismo consiste en tomar como punto de partida un ciclo de fase y sumarle a los demás el número entero correspondiente para eliminar las discontinuidades de tamaño 2π . En ausencia de ruido es una operación trivial, pero cuando lo hay debido a decorrelación o ciclos perdidos en zonas de acortamiento, inversión o sombra, se pueden obtener resultados poco realistas.

Para lidiar con este problema existen numerosos algoritmos (Chen y Zebker, 2001; Costantini, 1998; Costantini *et al.*, 1999; Ghiglia y Pritt, 1998) que han dado resultados dispares. En este trabajo se utilizó la solución integrada en el *software* Evinsar 2.1, que consiste en un algoritmo semiautomático. El *software* calcula inicialmente una solución en forma automática, que minimiza las discontinuidades remanentes. Luego, en forma manual ésta se mejora, teniendo en cuenta el mapa de coherencia (correlación interferométrica). Concretamente, el operador le indica al algoritmo dónde debe colocar las zonas de discontinuidad, basándose en un cierto conocimiento de la topografía y fundamentalmente en la distribución de zonas de baja coherencia (Atlantis Scientific Inc., 1999).

La figura 3 muestra los interferogramas y mapas de coherencia obtenidos mediante el procesamiento de los pares ascendente y descendente. Se aprecia claramente que existen, en el área de interés, numerosas zonas de baja coherencia (y, por lo tanto, de fase ruidosa) principalmente alineadas

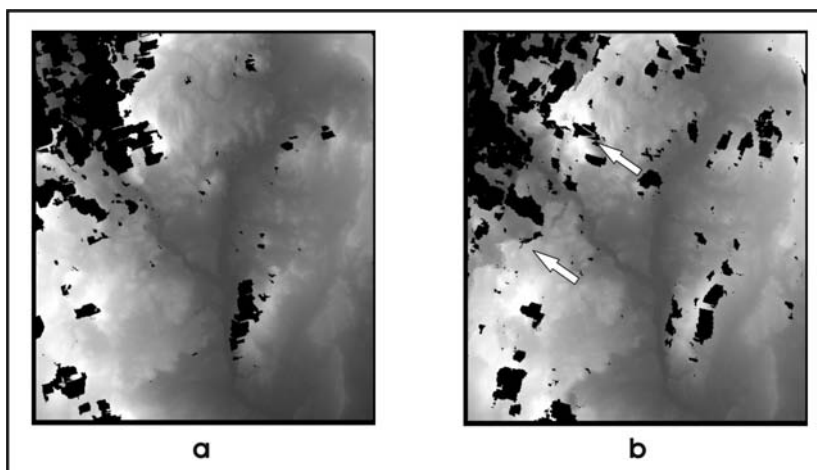


Figura 4. a) MDE ascendente. b) MDE descendente. Pueden observarse las discrepancias entre ambas estimaciones de la topografía (algunas de ellas indicadas con flechas en B), debido a errores de desenrollado de fase. Obsérvese también que hay varias zonas donde la topografía no pudo ser resuelta.

con laderas orientadas hacia el radar en cada caso. Por esta razón, el desenrollado de fase requirió gran cantidad de esfuerzo por parte del operador.

Finalmente, una vez superadas las etapas 6 y 7, se obtuvieron dos MDE no corregidos: uno proveniente del par ascendente y el otro del par descendente, que se muestran en la figura 4. Es necesario decir que los huecos que aparecen en ambos MDE corresponden a zonas de muy baja coherencia, que no pudieron ser resueltas.

Proceso de corrección y fusión basado en la coherencia

Los dos MDE obtenidos, provenientes uno del par ascendente y el otro del par descendente, constituyen

dos estimaciones de la topografía del área de interés. Las diferencias existentes entre una y otra son atribuibles fundamentalmente a dos tipos de errores: 1) diferencias en el desenrollado de fase; y 2) efectos atmosféricos. Los errores del primer tipo son grandes discontinuidades, algunas de las cuales han sido destacadas en la figura 4. Además, es posible notar que en ambos casos existen numerosas zonas no resueltas y, que afortunadamente, dichas zonas en su gran mayoría no son coincidentes.

La solución es sintetizar un único MDE a partir de las dos estimaciones, aprovechando lo mejor que pueda aportar cada una de ellas. Este concepto va más allá de cubrir las zonas no resueltas en un MDE con la parte correspondiente del otro y a la inversa.

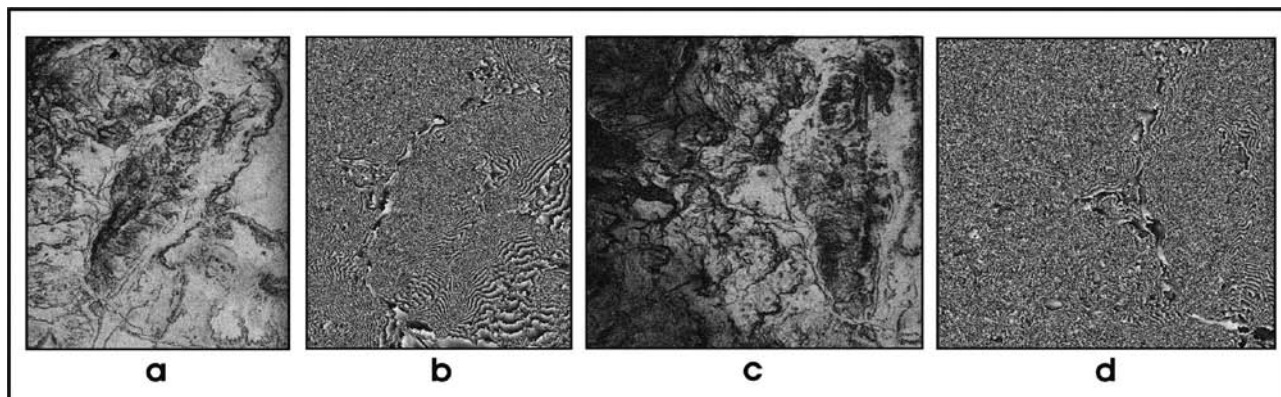


Figura 3. a) Mapa de coherencia correspondiente al par ascendente (colores claros indican mayor coherencia). b) Interferograma ascendente, puede observarse como, donde la coherencia es alta, las franjas de interferencia son bien definidas; mientras que donde hay baja coherencia, la fase se vuelve ruidosa. c y d) Coherencia e interferograma correspondiente al par descendente. Nótese como hacia la izquierda la coherencia baja drásticamente debido a que es una zona muy escarpada.

Al tener en cuenta que la deformación por visión lateral torna las laderas que miran hacia el radar como áreas típicas de muy baja coherencia, y que la configuración de adquisición adoptada permite tener las dos visiones (directa y opuesta) de una ladera, se desea reconstruir la topografía utilizando en cada caso el MDE que haya resultado de mejor calidad. Esto se logró al utilizar una fusión de ambos MDE basada en ésta, ya que la coherencia constituye una estimación de la confiabilidad de la fase interferométrica medida pixel a pixel.

Para ello se procesaron ambos mapas de coherencia (asociados a los pares ascendentes y descendentes) mediante filtros especialmente diseñados para obtener un mapa de coherencia conjunta (MCC) que indica de qué MDE debe ser extraído cada pixel. Posteriormente, cada MDE (ascendente y descendente) se filtra tomando al MCC como máscara. La figura 5 presenta el MCC y los MDE filtrados. Es interesante notar que el MCC tiene la distribución esperada: cada MDE contribuye con las laderas opuestas a la pasada del satélite (figura 5). Además, el MDE ascendente brinda la mayor contribución areal debido a que, en general, presenta valores de coherencia más elevados.

El siguiente paso es la fusión propiamente dicha, que se debe lograr sin que aparezcan discontinuidades entre los píxeles cubiertos por cada MDE. Ello se logró al deformar el MDE des-

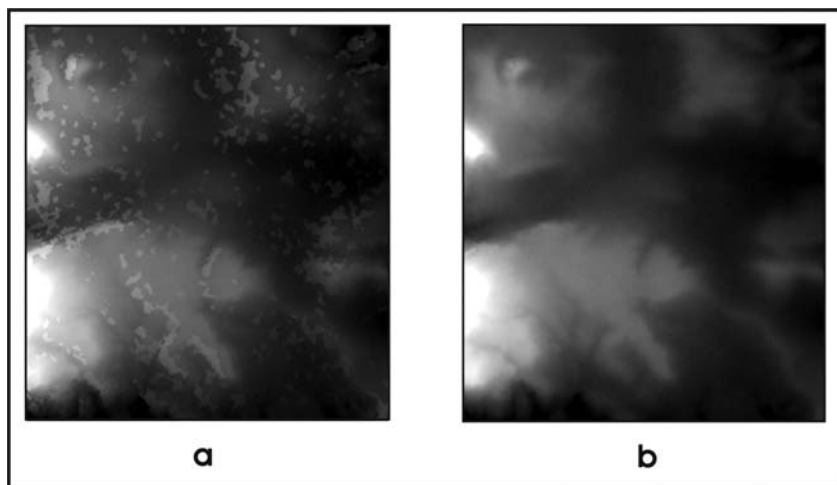


Figura 6. a) Resultado de una mala fusión de los MDE ascendente y descendente. Puede observarse claramente que existen numerosas discontinuidades entre uno y otro. b) Resultado de una fusión exitosa.

cendente con puntos extraídos del MDE ascendente. La clave del procedimiento es llevar el MDE descendente a los valores de cota del MDE ascendente en las zonas que serán cubiertas por este último (que es el de mayor cobertura areal). De esta manera, las zonas que serán cubiertas por el MDE descendente en el producto final quedan ubicadas sin discontinuidades en los huecos del MDE ascendente (pero no se deforman, conservan la calidad del resultado interferométrico). Es relativamente sencillo evaluar el éxito de esta operación, ya que si la fusión no es correcta, el resultado tiene una apa-

riencia granulosa debido a las discontinuidades, tal como se muestra en la figura 6. Para realizar las deformaciones pertinentes se utilizó un conjunto de algoritmos de desplazamiento rígido en cota, inclinación e interpolación lineal filtrada (descritos con detalle en Euillades y Vénere, 2003).

Correcciones finales

Finalmente, resta la remoción de posibles deformaciones regionales que son habituales en productos interferométricos. El origen de estos problemas

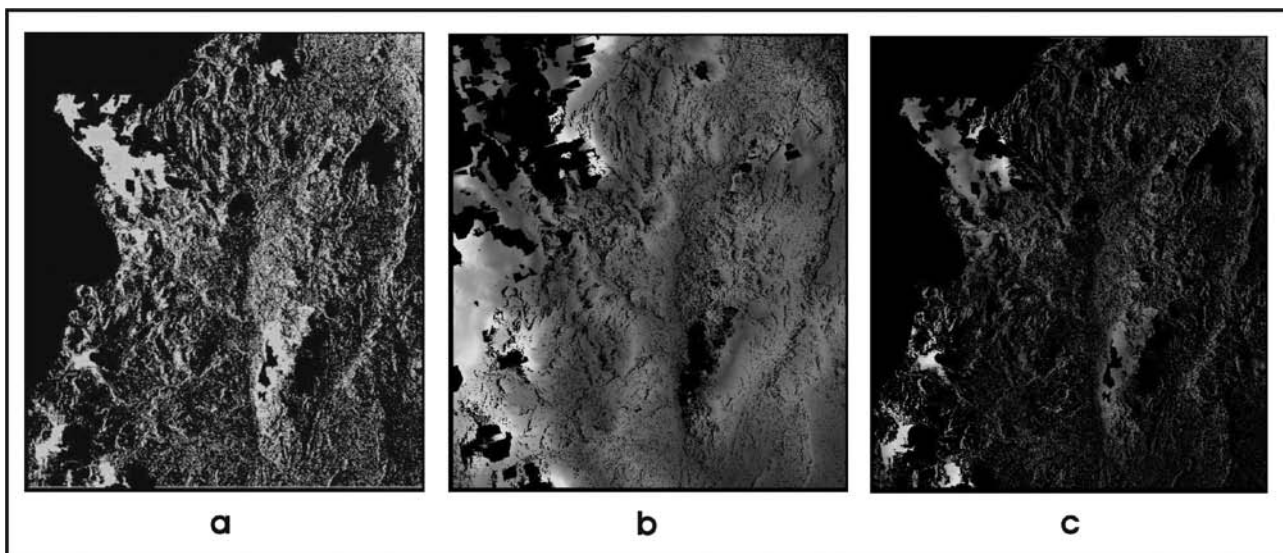


Figura 5. a) Mapa de coherencia conjunta utilizado para determinar las contribuciones relativas de los MDE ascendente (negro) y descendente (blanco). b) Contribución del MDE ascendente. c) Contribución del MDE descendente.

radica en errores introducidos por influencia atmosférica y defectos en los parámetros de posicionamiento orbital de los satélites. Para corregirlos, es necesario obtener información de cota independiente; idealmente, puntos distribuidos de manera uniforme en el área de interés.

En el presente caso se utilizaron puntos de estacas sísmicas distribuidas tal como lo muestra la figura 7A, y la corrección se llevó a cabo mediante los algoritmos ya descritos (Euillades y Vénere, 2003).

El MDE fusionado presenta errores respecto de las estacas sísmicas, caracterizados por una media $\mu=-16,1\text{m}$ y una desviación estándar $\sigma=78,7\text{m}$ (tomando como base 2783 puntos de control). Además, la distribución espacial de los errores devela una fuerte inclinación en sentido este-oeste, tal como se muestra en la figura 7B. Luego de aplicarse los distintos algoritmos de corrección, el MDE final resulta con $\mu=0,1\text{m}$ y $\sigma=11,3\text{m}$, calculados al utilizar la totalidad de las estacas sísmicas (50.794 puntos).

Interpretación estructural

Cálculo de rumbo y buzamiento estructural

Sobre el MDE y a partir de un área previamente seleccionada, se extrajo la información xyz de cada nodo de elevación. Sobre esta matriz se definieron celdas triangulares, que conformaron un plano por cada tres nodos más próximos. El cálculo de rumbo estructural y buzamiento se realizó utilizando algoritmos trigonométricos sobre cada plano, asignando estos valores a las coordenadas del punto medio de cada triángulo.

Una vez obtenidos los cálculos de rumbo y buzamiento, se los grafica sobre una imagen satelital o en un fotomosaico. El objetivo de este paso consiste en la limpieza del archivo, ya que los datos del MDE no representan a la estructura en todas sus zonas. En regiones con una topografía muy irregular (por ejemplo, quebradas profundas) no se pueden usar los datos estructurales obtenidos. Los datos de estas zonas se limpian a través de un criterio estimativo. Después de este

paso, los datos ya pueden usarse directamente para evaluaciones estructurales. Para el análisis estructural presentado aquí se usó el programa 2Dmove (version 4.1).

En el presente trabajo se analizó una zona con el método descrito, ubicada dentro de la faja plegada, sobre el sector noroccidental de la Cuenca Neuquina.

Se trata de un anticlinal de orientación norte-sur cuyas dimensiones son aproximadamente ocho kilómetros de

largo y seis de ancho. Después de aplicar todos los pasos de procesamiento, cálculo y refinación, se graficaron los valores estructurales georeferenciados sobre un mosaico aéreo. En la figura 10A se visualiza una vista 3D del MDE, y en la 10B se unió el MDE con un mosaico de fotografías aéreas; sobre esta imagen se realizó un montaje de los rumbos y buzamientos calculados. La zona de muestra representa una parte del limbo oriental de la estructura.

En el área de estudio se realizó una

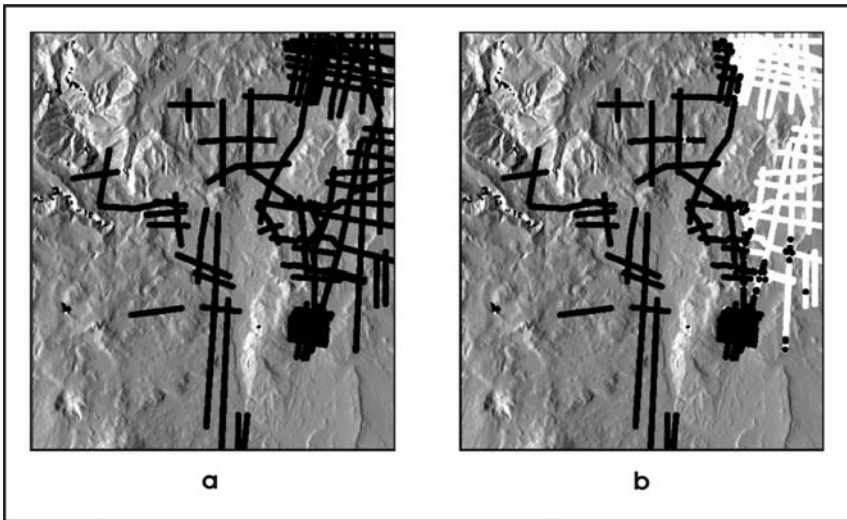


Figura 7. a) Ubicación de las estacas sísmicas utilizadas para realizar las correcciones finales. b) Distribución de errores iniciales del MDE fusionado. Los puntos negros son errores negativos, mientras que los blancos son positivos. Es evidente que existe una inclinación de carácter regional, que fue posteriormente corregida.

campana de medición de rumbos y buzamientos durante el mapeo de campo. Estos datos fueron comparados con los obtenidos a partir del MDE. Luego de graficar los dos grupos de datos sobre estereogramas se pudo reconocer una clara coincidencia entre



Figura 8. En rojo, área de estudio sobre faja plegada del sector Noroccidental de la Cuenca Neuquina.

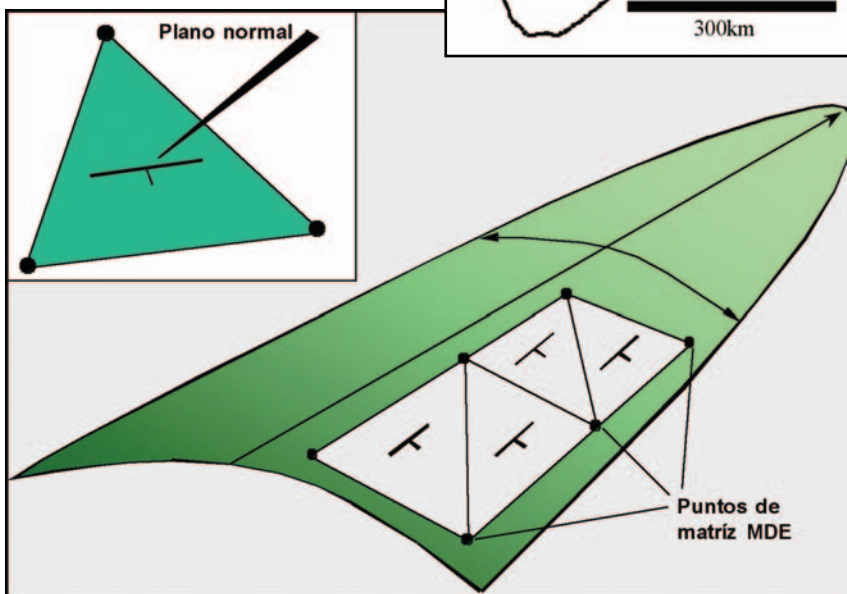


Figura 9. Definición de celdas triangulares y cálculo de rumbo y buzamiento sobre la matriz seleccionada.

ambos. Los mismos muestran una orientación norte-sur del eje longitudinal de la estructura analizada.

Conclusiones

La integración de los datos de interferometría a partir de dos pares de imágenes, uno en modo ascendente y otro en modo descendente, permitió resolver un terreno con importantes desniveles topográficos. Esta integración se tuvo en cuenta debido a la deformación por visión lateral del radar de apertura sintética sobre este tipo de terrenos.

El MDE utilizado en este trabajo, dada su alta resolución espacial de veinte metros, permitió realizar interpretaciones estructurales. La gran cantidad de valores reunidos (en el orden de varias centenas) a lo largo de una estructura posibilitó un muestreo adecuado de los afloramientos, permitiendo así los cálculos estadísticos y la construcción de estereogramas. En el presente caso, el muestreo de datos cumplió con esta condición, puesto que la zona de estudio tiene varios kilómetros de ancho y normalmente se encuentran allí centenas o hasta miles de puntos del MDE.

La aplicación del método presentado se limita a zonas donde la topografía coincide con los planos estructurales; el terreno estudiado cumplió con esta condición: el radar no puede registrar zonas con capas inclinadas mayores a 50° , por lo que éstas tampoco pueden usarse. ■

Agradecimientos

Queremos agradecer a Wintershall Energía SA y Total Austral, por haber aprobado el presente trabajo.

Bibliografía

- Atlantis Scientific Inc, *EVInsar version 1.2 User's Guide*, Canadá, Atlantis Scientific Inc., 1999.
- Chen, C. W. y Zebker, H. A., "Two-Dimensional Phase Unwrapping with use of Statistical Models for Cost Functions in Nonlinear Optimization", en *Journal of Optical Society of America*, v. 18, 2001, pp. 338-351.
- Costantini, M., "A Novel Phase Unwrapping Method based on Network Programming",

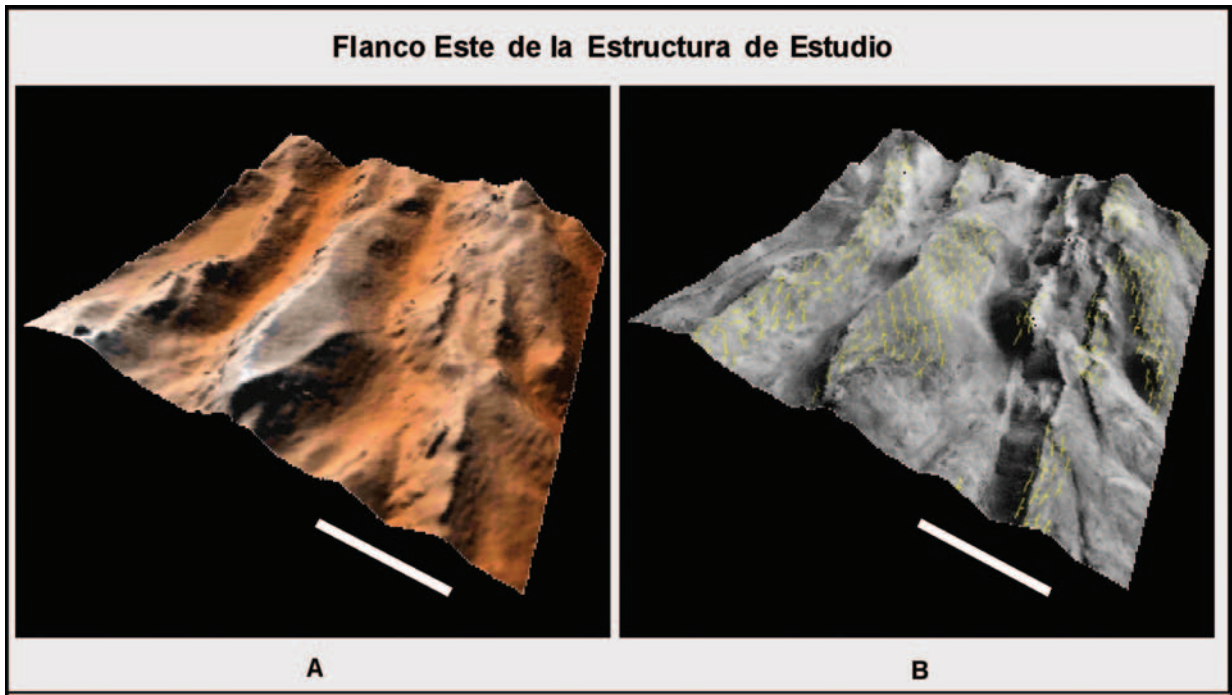


Figura 10. A) Vista 3D del flanco este de la estructura de estudio sobre el MDE. B) Superposición de los símbolos de buzamientos y rumbo, sobre montaje 3D de MDE y mosaico de fotos aéreas.

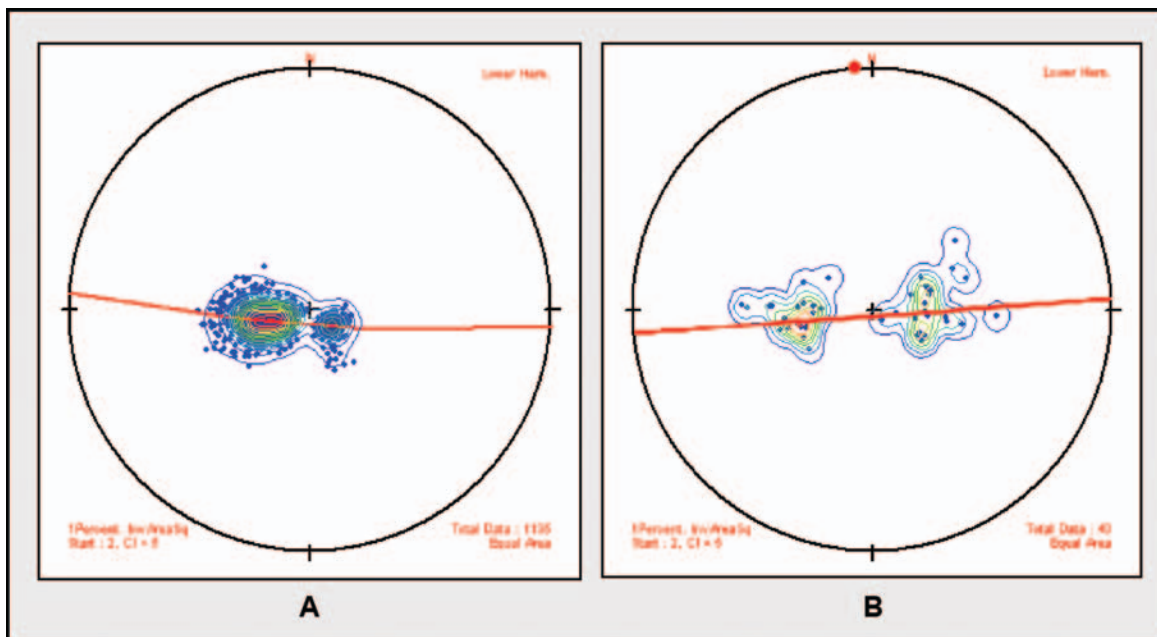


Figura 11. A) Estereograma realizado con 1135 valores calculados sobre el MDE. B) Estereograma realizado con 43 valores medidos en el campo. Ambos diagramas, calculados por procedimientos independientes, muestran una buena correlación de los círculos mayores de ajuste óptimo y presentan una dirección aproximada norte-sur, para la orientación del eje del pliegue.

- en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, 1998, pp. 813-821.
- Costantini, M.; Farina, A. y Zirilli, F., "A Fast Phase Unwrapping Algorithm for SAR Interferometry", en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 37, 1999, pp. 452-460.
- Curlander, J. C. y McDonough, R. N., *Synthetic Aperture Radar. Systems and Signal Processing: Wiley Series in Remote Sensing*, Nueva York, John Wiley & Sons, 1991.
- Euillades, P. y Vénere, M., "Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros", en *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo en Ingeniería*, v. 19, 2003, pp. 33-44.
- Franceschetti, G. y Lanari, R., *Fundamentals, Synthetic Aperture Radar Processing*, Boca Raton, CRC Press LLC, 1999, pp. 1-71.
- Gens, R., "Quality Assessment of SAR Interferometric Data", tesis de posgrado, Universität Hannover, Hannover, 1998, p. 150.
- Ghiglia, D. C. y Pritt, M. D., *Two-Dimensional Phase Unwrapping. Theory, Algorithms, and Software*, Nueva York, Wiley-Interscience, 1998, p. 493.
- Li, F. y Goldstein, R. M., "Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars", en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 28, 1990, pp. 88-97.
- Lillesand, T. M. y Kiefer, R. W., *Remote Sensing and Image Interpretation*, Nueva York, John Wiley & Sons, 1994, p. 750.
- Prati, C. y Rocca, F., "3-D Synthetic Aperture Radar Surveys", en *SEP-57*, 1988, pp. 463-477.
- Ulaby, F. T.; Moore, R. K. y Fung, A. K., "Microwave Remote Sensing: Active and Passive", en *Remote Sensing*, v. 2, Norwood, Artech House, 1986.
- Zebker, H. y Goldstein, R. M., "Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations", en *Journal of Geophysical Research*, v. 91, 1986, pp. 4993-4999.
- Zebker, H. y J. Villasenor, "Decorrelation in Interferometric Radar Echoes", en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 30, 1992, pp. 950-959.