

## CONTROL DE CALIDAD GEOMÉTRICA DE MNT OBTENIDOS POR IFSAR POR MEDIO DEL PDEM

J. F. Zelasco, J. Donayo, J. L. Fernández Ausinaga y B. Sulpis.

FI-UBA / FCE-UNCPBA, Matheu 1222, 1249, C.A. de Buenos Aires. [jfzelasco@gmail.com](mailto:jfzelasco@gmail.com)

### RESUMEN

En los MNT obtenidos por Interferometría RAS (IFSAR) la precisión planimétrica en el eje x es diferente de la del eje y (range axis) y el error en altimetría está correlacionado con el error en el eje transversal. El método "Perpendicular Distance Estimation Method" (PDEM) presentado en trabajos anteriores permite evaluar el error altimétrico y planimétrico. En uno de ellos se analiza el caso de los MNT obtenidos por tecnología IFSAR. En este trabajo se han mejorado los resultados modificando la selección de triángulos que definen la superficie.

### ABSTRACT

The precision in the azimuth axis may be different from the precision in the range-axis and the error in elevation is correlated with the error in the range-axis in the case of the DEM's obtained by IFSAR techniques. The "Perpendicular Distance Estimation Method" (PDEM) proposed recently allows the evaluation of the DEM accuracy vertical and horizontal. In one of these recent works it has been analyze the case of the DEM's obtained by IFSAR technology. In this work the results are improved modifying the selection of triangles defining the surface.

**Palabras clave:** calidad de los MNT, precisión geométrica en SIG, control de calidad 3D, calidad geométrica de MNT IFSAR.

### INTRODUCCIÓN

Los Modelos Numéricos de Terreno (MNT; en inglés: Digital Elevation Models DEM), frecuentemente almacenados en Sistemas de Información Geográfica (SIG), son obtenidos, generalmente, por medio del tratamiento de imágenes aéreas o satelitales (SPOT; Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER; InterFerometry Synthetic Aperture Radar, IFSAR, etc.). El control de la calidad geométrica de los MNT obtenidos por tecnología IFSAR es el sujeto de interés de este trabajo. "Calidad" significa precisión geométrica en relación a un MNT de referencia considerado sin error (r-MNT). Se asume que el r-MNT es un modelo exacto de la superficie real ya que su error sería despreciable respecto del error del MNT cuya calidad se desea evaluar (e-MNT). De todos modos, se puede considerar que se busca simplemente poder estimar la precisión de un e-MNT con relación a otro tomado como referencia ya que no hay forma de comparar un e-MNT con la superficie real si no es por medio de un modelo de la misma. Este problema ha sido resuelto para los MNT obtenidos por estereoscopia (rango del óptico o infrarrojo) o para los MNT

obtenidos por otras técnicas clásicas (Zelasco 2002, Zelasco *et al.* 2005).

La sección 2 presenta el estado del arte. La sección 3 describe el problema de correlación entre la planimetría y la altimetría y propone la solución. La sección 4 explica el experimento. Finalmente, la sección 5 expone las conclusiones del estudio.

### ANTECEDENTES

Para la estimación del error, establecer para cada punto del e-MNT de estudio su correspondiente en el r-MNT de referencia es un problema crítico. Problemas análogos fueron estudiados para evaluar el error horizontal en mapas en Abbas *et al.* (1994), Grussenmeyer *et al.* (1994) y Hottier (1996). Estos autores encontraron que la disimetría entre el modelo y la referencia es el factor que causa la mayor dificultad para encontrar pares homólogos. Abbas *et al.* (1994), Grussenmeyer *et al.* (1994) y Hottier (1996) proponen una opción alternativa al método de control puntual. Se trata del control lineal basado en la asimetría de la distancia de Hausdorff. Habib (1997) analiza precisión y exactitud en altimetría y menciona algunas de las

propuestas de la última década para el control de calidad en elevación.

El inconveniente mayor es que muchos puntos M del e-MNT no son identificables en el r-MNT, ya que no hay forma de distinguirlos de sus vecinos.

Encontrar pares de puntos correspondientes (homólogos) es difícil para un operador. Automatizar esta tarea resulta extremadamente delicado. En el caso de la estimación de la precisión altimétrica de un MNT obtenido por tecnología ASTER, perfiles y puntos de control (benchmarks) han sido utilizados para la estimación del error. Sin embargo, el uso de perfiles no toma en consideración ni el error horizontal, ni la posible discrepancia modelo-referencia. Más aún, la elección y número de "benchmarks" no es necesariamente un buen muestreo estocástico.

A la luz de las dificultades expuestas, en Zelasco y Ennis (2000) se propone un estimador de variancias de los errores verticales y horizontales. Los valores obtenidos por el PDEM, según la irregularidad del terreno y el número de puntos de la muestra del MNT se estudiaron haciendo diversas simulaciones que se describen en Zelasco (2002).

#### Descripción del PDEM

La precisión geométrica del MNT es una función de los vectores  $e(M_k)$  del muestreo  $\{M_k\}$  de puntos. Con esta función se construye la matriz de variancia-covariancia  $\sigma^2(e)$ . Cuando los errores en las tres direcciones son diferentes, como en el caso de la IFSAR, el rango de  $\sigma^2(e)$  es tres. Sus valores propios son las variancias en los tres ejes de coordenadas. Cuando el error planimétrico es isotrópico ( $\sigma_x^2 = \sigma_y^2$ ; técnicas clásicas), el rango de la matriz de covariancia es dos. Los valores propios son las variancias  $\sigma_x^2$ , y  $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma_{xy}^2$ . En el caso general, en un referencial rotado, la nueva matriz de covariancia no es más diagonal. Los nuevos componentes están expresados en términos de valores propios de  $\sigma^2$  (matriz de variancia-covariancia). La expresión siguiente corresponde a la primera componente  $\sigma_x'^2$  de la nueva matriz de variancia-covariancia:

$$\sigma_x'^2 = a_{11}^2 \sigma_x^2 + a_{12}^2 \sigma_y^2 + a_{13}^2 \sigma_z^2 \quad [1]$$

donde los  $a_{1j}$  son los cosenos directores del vector unitario en la dirección de la coordenada  $x'$  del referencial rotado. El valor de la variancia en la

dirección arbitraria  $x'$  es igual al cuadrado de la distancia entre dos planos normales a  $x'$ , uno tangente a la elipse de distribución error (cuyos parámetros son  $a = \sigma_x$ ;  $b = \sigma_y$ ;  $c = \sigma_z$ ) y el otro pasando por su centro. La ecuación [1] permite obtener la variancia en una dirección  $d$  cualquiera, los coeficientes  $a_{ij}$  son los valores de los cosenos directores ( $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$ ,  $\cos \gamma$ ) correspondientes a dicha dirección  $d$ :

$$\sigma_d^2 = \sigma_x^2 \cos^2 \alpha + \sigma_y^2 \cos^2 \beta + \sigma_z^2 \cos^2 \gamma \quad [2]$$

$\sigma_d^2$  se estima por medio de  $\sum e_i^2/n$   $0 < i < 1$ , donde cada  $e_i$  es la componente del error en la dirección  $d_k$ . Se construye una red de triángulos con los puntos del r-MNT, con lo que se obtiene un modelo continuo facetado de la superficie de referencia. La proyección de un punto M del e-MNT de estudio, en el plano xy se ubicará dentro de la proyección de un único triángulo T del r-MNT. El triángulo T es el correspondiente al punto M, y se deben evitar los problemas de borde. La componente del error en la dirección  $d_k$  es la distancia  $d_k$  del punto  $M_k$  del MNT de estudio al triángulo  $T_k$  correspondiente del r-MNT. Los cuadrados de las distancias  $d_k$ , entre cada punto del modelo y el plano del triángulo correspondiente permite establecer un estimador de cuadrados mínimos para la evaluación de las variancias ( $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$ ,  $\sigma_z^2$ ).

$$d_k^2 = \sigma_x^2 \cos^2 \alpha + \sigma_y^2 \cos^2 \beta + \sigma_z^2 \cos^2 \gamma \quad [3]$$

#### CORRELACIÓN DEL ERROR EN MNT OBTENIDOS POR IFSAR: REFORMULACIÓN DEL PDEM

La geometría IFSAR conlleva una correlación entre el eje y (range axis) y el eje z vertical (Figura 1).

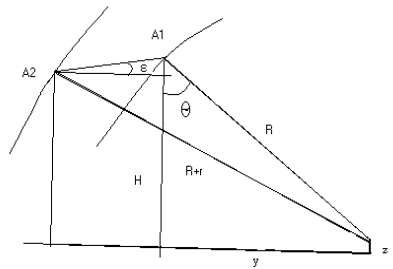


Figura 1.- Geometría IFSAR.

Se logra una matriz de covarianza diagonal (no correlación) por medio de una rotación alrededor del eje x. La rotación hace coincidir el eje z' con la dirección del radar. Se justifica esta hipótesis a partir de las fórmulas presentadas en los artículos de Massonnet *et al.* (1996) y Massonnet y Feigl (1995). Luego de la rotación, en el nuevo referencial, el eje x paralelo a la trayectoria del satélite no cambia de posición, y los ejes y' y z' pertenecen al plano normal a la trayectoria y de esta manera las variables aleatorias en las tres direcciones no están correlacionadas.

B es la base (distancia entre las antenas A1 y A2), H es la altura de la antena A1 y R es la distancia de la antena A1 al blanco C. El valor de z (altura del blanco) está dado por:  $z = H - R \cos \theta$  donde H y R son dato y  $\cos \theta$  es incógnita. Siendo:

$$\cos \theta = \cos \epsilon \cos \alpha + \sin \epsilon \sin \alpha \sin(\theta - \epsilon)$$

y,

$$\cos(\theta - \epsilon) = (1 - \sin^2(\theta - \epsilon))^{1/2}$$

En el triángulo de vértices A1 A2 C formado por las dos antenas y el blanco, R + r es la distancia entre la antena A2 y el blanco C y  $\alpha$  el ángulo en A1. Entonces:

$$(R+r)^2 = B^2 + R^2 + 2BR \cos \alpha$$

donde R, B, r (r es función de la diferencia de fase y la longitud de onda) son conocidos y  $\alpha = 90 + \theta - \epsilon$ . Es decir:  $\cos \alpha = \sin(\theta - \epsilon)$ , la altura z del blanco es:

$$z = H - R \cos \theta \quad [4]$$

$$y = R \sin \theta \quad [5]$$

De las fórmulas [4] y [5] surge la manera en que los valores y (range axis) y z (altura) del blanco están correlacionados puesto que ambos son función de  $\theta$  y de R, Zelasco (2005) y Zelasco *et al.* (2008).

### DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El r-MNT está compuesto por un conjunto de puntos lo que permite construir con ellos una red de K triángulos. Cada triángulo  $T_k$  ( $k=1, \dots, K$ ) pertenece a un plano definido por un vector unitario  $\mathbf{n}_k$  ( $k=1, \dots, K$ ). Se debe determinar.

- El centro de masa de cada triángulo y expresar sus coordenadas en un sistema de referencia rotado.

- Un valor de desviación estándar  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  para cada dirección en las que las variables aleatorias son independientes. A partir de estos valores se determinan valores aleatorios que siguen la ley Normal (ruido) y se adicionan al centro de masa de los triángulos en las direcciones de los 3 ejes expresados en este nuevo referencial. Los puntos de coordenadas cuyos valores resultan de esta adición conforman el MNT simulado.
- Expresar las coordenadas de vector unitario normal  $\mathbf{n}_k$  al triángulo en el nuevo referencial.
- Calcular la distancia que separa cada punto del e-MNT a evaluar (real o simulado), del plano que contiene el triángulo correspondiente.
- Evaluar la desviación normal de los puntos del MNT en las direcciones de cada coordenada del sistema rotado:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ .

### EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Se muestran a continuación varias pruebas que fueron realizadas aplicando diferentes valores de error en las direcciones de los tres ejes. Los valores promedios en los tres ejes están dados por:

$$\sigma_x = (\sum_n \sigma_{x_n})/N; \quad \sigma_y = (\sum_n \sigma_{y_n})/N; \quad \sigma_z = (\sum_n \sigma_{z_n})/N$$

La desviación estándar de  $\sigma$  está definida como  $\{[\sum_n (\sigma_n - \sigma_{(n)})^2]/N\}^{1/2}$  donde  $\sigma_{(n)}$  es el valor verdadero de la muestra – muy similar al valor utilizado para producir el muestreo de errores (ruido) – y  $\sigma_n$  es el valor obtenido por medio del PDEM.

Siete tests fueron realizados. Ellos difieren en los valores utilizados para producir el ruido (errores producidos en los tres ejes y que conforman los puntos del e-MNT de estudio). Esta elección permite estudiar el comportamiento del PDEM con diferentes relaciones de ruido en los ejes. Para cada prueba se tiene:

- El valor de  $\sigma$  utilizado para producir ruido en cada eje.
- Las estimaciones obtenidas por medio del PDEM.
- La desviación estándar de las estimaciones.
- Y su error relativo (desviación estándar/ruido).

Se realizaron las simulaciones A, B, C, D, E, F. La simulación A corresponde a una selección de ángulos respecto a los 3 ejes en igual proporción (500 triángulos en cada caso, es decir, un total de 1500) y de manera que los mismos, en los ejes x e y', no superen los 60 grados. Los resultados son buenos en los tres

ejes, aunque en los dos primeros tests en el eje x son mediocres y el último test da resultados excelentes. En la simulación B la idea es tomar una mayor cantidad de ángulos favorables al eje x, lo que empeora los resultados en la dirección de dicho eje, que pasan a ser equivalentes a los de la simulación 0. La simulación C, en la que se excluye la selección de triángulos respecto del eje z', también empeora los resultados. La simulación D en la que se excluye la selección de triángulos respecto del eje y, empeora los resultados de la evaluación del error en la dirección del eje y'. En la simulación E la idea de tomar una mayor cantidad de ángulos favorables al eje z' empeora los resultados en la dirección del eje x, que pasan a ser equivalentes a los de la simulación 0.

## DISCUSIÓN

Hacer intervenir el ángulo del haz mejora la precisión en el eje y'. La consecuente rotación incrementa la variación relativa de la inclinación de los triángulos de la referencia. Sin embargo, los resultados de la evaluación del error en la dirección del eje x es pobre y en algunos casos. La evaluación en el eje z' es excelente y no es sesgado como sucede con el método habitualmente utilizado que consiste en evaluarlo a partir de la distancia vertical. La estimación de  $\sigma_y$  es, en casi todos los casos, muy satisfactoria, donde el error relativo es inferior al 10%. La evaluación del error según la dirección del eje x, que es la dirección crítica para la evaluación del correspondiente error, tiene una mayor precisión si se seleccionan triángulos T con criterios relativos a los tres ejes y los resultados mejoran aún más si los errores en las tres direcciones tienen valores similares. Es decir los valores relativos del ruido utilizado en las simulaciones tienen una influencia no despreciable en la calidad de los resultados obtenidos en la dirección del eje x.

## BIBLIOGRAFÍA

Abbas, I., Grussenmeyer, P. and Hottier, P. 1994. *Base de Données géolocalisées: estimation de l'erreur cartographique: une méthode fondée sur la distance Hausdorff: le contrôle linéaire. Remarques sur le contrôle ponctuel.* Notes de cours, ENSG, IGN, France.

Grussenmeyer, P., Hottier, P. and Abbas, I. 1994. Le contrôle topographique d'une carte ou d'une base de données constituées par voie photogrammétrique.

*Journal XYZ* 59 (Association Française de Topographie): 39-45.

Habib, M. 1997. *Etude, par simulation, de la précision altimétrique et planimétrique d'un MNT obtenu par corrélation d'images spatiales (capteur à balayage) - Précision d'un MNT régulier - Erreur de rendu d'un semis régulier - Description d'une structure de MNT régulier.* Thèse, Université Paris 7.

Hottier, P. 1996. Qualité géométrique de la planimétrie. Contrôle ponctuel et contrôle linéaire. Dossier: La notion de précision dans le SIG, *Revue Géomètre* 6 (Ordre des Géomètres-Experts Français): 34-42.

Massonnet, D. and Feigl, K.L. 1995. Radar interferometry and its applications to changes in the Earth surface. *Reviews of Geophysics* 36: 441-500.

Massonnet, D., Vadon, H. and Rossi, M. 1996. Reduction of the need for phase unwrapping in radar interferometry. *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing* 34: 489-497.

Zelasco, J.F. and Ennis, K. 2000. Solución de un problema en la estimación de variancias en un caso especial en el que no se pueden aplicar estimadores habituales. *XXVIII Coloquio Argentino de estadística*, Posadas, Misiones, Argentina.

Zelasco, J.F. 2002. Contrôle de qualité des modèles numériques des bases de données géographiques, *Journal XYZ* 90 (AFT): 50-55.

Zelasco, J.F., Porta, G. and Fernández Ausinaga, J.L. 2005. Geometric Quality in Geographic Information. In: Doorn J.H., Rivero L.C. and Ferraggine V.E. (eds.), *Encyclopedia of Database Technologies and Applications*, 1st ed. Idea Group Inc., Hershey.