



El SRTM 90m DEM de la NASA. Aplicación para Santiago del Estero.

Lucrecia Galván¹, Claudia Infante¹, Iber Goitea¹, Javier Duro¹, Fabián Candelerero¹, Daniel Quiroga¹.

(1) *Departamento de Agrimensura, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.*

lgalvan@unse.edu.ar; cinfante@unse.edu.ar; ihgoi@unse.edu.ar; ajduro@unse.edu.ar; fabiancandelerero@hotmail.com; victor_q_22@hotmail.com

RESUMEN: La Misión Topográfica de Radar del Transbordador (SRTM) Endeavour de la NASA (Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial) produjo el primer modelo digital de elevación (DEM) de libre disposición, de alta resolución espacial y errores en alturas menores a los 16m, hasta el momento. En el presente trabajo se compara el modelo SRTM 90m con los datos de la red altimétrica de alta precisión y datos de la red POSGAR 07 del Instituto Geográfico Nacional para la provincia de Santiago del Estero. El SRTM 90 DEM presenta una DESV EST de 18 m en los puntos de nivelación y una DESV EST de 1.9 m en los puntos POSGAR 07. Dado los resultados obtenidos con la red POSGAR 07 se profundiza el análisis del DEM con estos datos. Se presenta un mapa de errores y el cálculo de un mapa de pendientes con la finalidad de evaluar el modelo para zonas de características topográficas similares. Los resultados para la zona llana presentan un sigma de 1.4 m. Se establecen las conclusiones generales para la provincia y las tareas a desarrollar en el futuro.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación

Los DEM proporcionan información de alturas de la superficie de la Tierra y las características sobre ella (Hirt et al., 2010). Un DEM incluye la altitud máxima (incluyendo techos de los edificios y las copas de los árboles) sobre un Datum de referencia y la estructura de datos es una matriz regular de elevaciones; los DEM se derivan de imágenes de satélite (El-Sheimy et al., 2005). Los modelos digitales de elevación son una importante fuente de datos para aplicaciones en las ciencias de la Tierra y del medio ambiente. Las tecnologías convencionales de cartografía han producido mapas de calidades dispares. Estos mapas se encuentran en una variedad de escalas y resoluciones, que a menudo, están referenciados a datums específicos de cada país y por tanto son inconsistentes a través de las fronteras nacionales. En muchas partes del mundo, como América del Sur y África, hay escasos datos topográficos de alta calidad. La producción de un DEM global de escala y resolución consistentes por medios convencionales, ha demostrado ser extremadamente difícil (cobertura de nubes, inaccesibilidad política) y costoso (aerofotogrametría). (Farr et al., 2007).

La interferometría de radar de apertura sintética (SAR, 1990) colocó al alcance de las naciones con desarrollo espacial la posibilidad de crear un DEM global de manera eficiente y asequible. La

Misión SRTM demostró el poder de la nueva técnica (Farr et al, 2007; Massonnet, D. et al, 2008)

Los datos SRTM mejoran considerablemente el conocimiento de la superficie de la Tierra, en particular en regiones en desarrollo con escasa infraestructura de datos geoespaciales como la provincia de Santiago del Estero.

Los DEM se usan en aplicaciones diversas, tales como, el modelado del campo de gravedad, estudios hidrológicos, la cartografía topográfica, la ortorrectificación de imágenes aéreas, la simulación de inundaciones y muchos más, de modo que, es importante evaluar la calidad de los mismos. La calidad de los datos de elevación se expresan comúnmente en términos de precisión vertical. Entre los métodos de evaluación de los DEM, se aplica en el presente trabajo, la comparación con datos terrestres para la determinación de la precisión vertical. La evaluación se realiza sobre la base de dos conjuntos de puntos de control terrestre (PCT), la red de nivelación de alta precisión y la red POSGAR 07 para la provincia (Hirt, C et al, 2010).

El presente trabajo aborda el estudio del modelo SRTM 90 m ver. 4.1 para la provincia de Santiago del Estero debido a los avances significativos, en términos de resolución espacial y cobertura alcanzados por el mismo.

1.2 El SRTM 90m DEM ver 4.1 y la misión satelital

El SRTM DEM mapeó la superficie terrestre entre los 60° de latitud Norte y los 56° de latitud Sur. El sensor usó la banda C utilizando la técnica de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR). Fue la primera misión espacial que produjo un conjunto de datos de elevación de alta resolución global. Las posiciones horizontales SRTM están referidas al sistema WGS84 y la posición vertical está referida al modelo gravitacional (Heiskanen et al., 1967) EGM96 (Lemoine et al. 1998). La versión 4.1 del SRTM de 3" de resolución espacial se distribuye en mosaicos de 5° x 5° que contienen 6001 x 6001 celdas con valores de alturas ortométricas. Ver Figura 1 mosaico para la provincia de Santiago del Estero.

La calidad de las elevaciones SRTM han sido analizadas por Reuter et al., 2007; Hirt et al., 2010; Bolten et al., 2010 en términos de promedios y desviación estándar (DESV EST). El CGIAR informa que los errores verticales de los datos SRTM 90m DEM son menores a 16m. (<http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>).

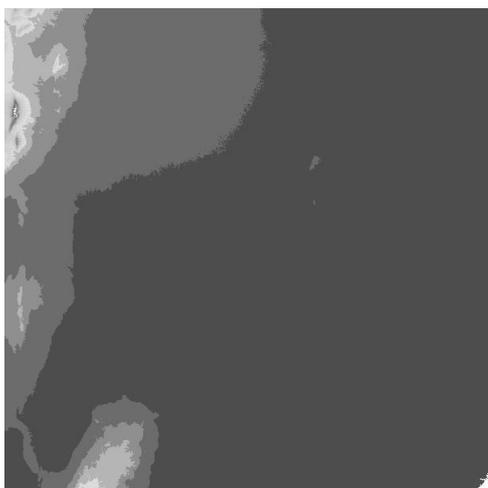


Figura 1: Mosaico SRTM90 de 5° x 5° para Santiago del Estero.

El SRTM utilizó dos radares de apertura sintética, en las bandas C y X. El objetivo operacional del radar C era generar cobertura de los mapas contiguos a lo solicitado por los objetivos de la misión. El objetivo del radar X era generar datos a lo largo de franjas discretas de 50km de ancho. El éxito de los radares SRTM radicó en que fueron diseñados para operar como interferómetros de una sola pasada, utilizando las capacidades de las bandas C y X. Para las operaciones de la interferometría de un solo paso, cada uno de los dos radares SRTM estaba

equipado con una antena adicional de sólo recepción, además de las principales antenas de transmisión / recepción situadas en la carga del transbordador. Las antenas adicionales fueron colocadas en el extremo de un mástil retráctil de 60 m (Fig. 2).

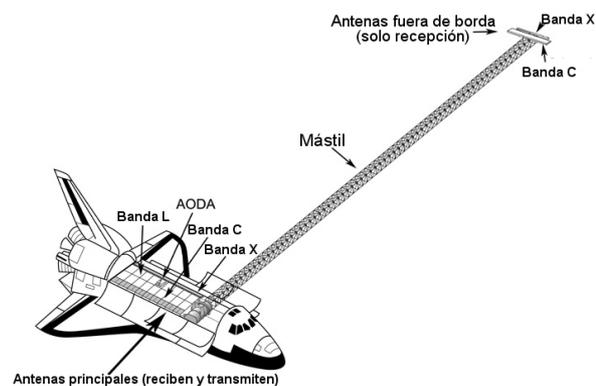


Figura 2: Componentes principales del SRTM. En el transbordador las antenas C, X y L (no se usó). Al final del mástil de 60m las antenas de solo recepción C y X.

El transbordador Endeavour fue lanzado con una tripulación de seis personas desde el Centro Espacial Kennedy el 11 de febrero de 2000. La altura nominal fue de 233 km y la inclinación orbital de 57°. Con esta geometría, el transbordador repitió 159 órbitas, en unos 10 días. En el Ecuador la órbita fue de 218 km y el ancho de la cobertura de imagen ScanSAR fue de 225 km (Fig. 4). (Farr et al., 2007)

1.3 La técnica.

Los radares son instrumentos que básicamente miden una sola dimensión, la distancia del radar a un objetivo de interés. Un instrumento de radar montado en una plataforma en movimiento puede adquirir mediciones de dos dimensiones de una ubicación, explotando el cambio de frecuencia Doppler de un objetivo, así como su alcance. Esta técnica de radar de apertura sintética (SAR) produce imágenes en dos dimensiones. (Farr et al, 2007).

Para acceder a la tercera dimensión, es necesaria la diferencia de distancia entre las dos imágenes de radar, y esto se realiza con mayor precisión y eficacia mediante los principios de la interferometría, ver Figura 3. Si se asume que la posición de las dos antenas (la "base interferométrica") es conocida, las dimensiones del triángulo de interferometría pueden determinarse con precisión, y así también la altura

de un punto dado (Fig. 3), Ecuación 1, (Farr et al., 2007).

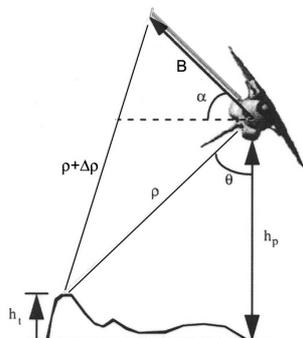


Figura 3: Geometría del interferómetro SRTM (no está en escala). El mástil forma la base B. Las mediciones de B, $\Delta\rho$, θ , α , y h_p conducen a la solución para la altura del terreno h_t .

$$h_t = h_p - \rho \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\lambda \phi}{2 \pi B} \right) + \alpha \right] \quad (1)$$

En la Ecuación 1 h_t es la altura del punto; h_p es la altura de la plataforma (altura de la antena con respecto al elipsoide de referencia WGS84); ρ es la distancia al punto; λ es la longitud de onda; ϕ es la fase interferométrica medida; α es el ángulo de la base o ángulo de referencia y B es la base interferométrica. La Tabla 1 muestra los observables SRTM. La orientación y determinación de la órbita aviónica (AODA) proporcionó los observables especificados en la segunda fila de la Tabla 1.

TABLA 1: observables misión SRTM.

Medidos por:	Parámetros
Radar	ρ y ϕ
AODA	α , B, h_p

La Figura 4 muestra la distribución de las franjas SRTM y la distribución de las polarizaciones. El radar C cubrió 225km. Las franjas 1 y 3 se iluminan, luego las franjas 2 y 4. La banda X no escaneaba, por lo que su franja de 50km se fijó entre las franjas 3 y 4.

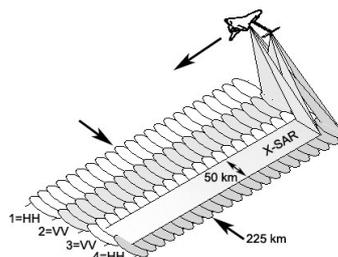


Figura 4: Distribución de las franjas SRTM.

2 ZONA DE ESTUDIO

La provincia de Santiago del Estero se caracteriza por ser una zona de llanura, con una leve pendiente general en su topografía en dirección Noroeste a Sureste. Está comprendida entre los extremos latitudinales de 25° S y 30° S y los extremos longitudinales de 60.5° O y 65.5° O.

3 DESCRIPCION DE LOS DATOS TERRESTRES.

3.1 Red de Nivelación de Alta Precisión IGN.

La posición de los puntos altimétricos de la Red Altimétrica de Alta Precisión Nacional está referida al sistema Campo Inchauspe 69 (CI69). Se realiza la transformación del sistema CI69 a WGS84 mediante la transformación de Molodensky. Esta transformación se efectúa con la finalidad que la comparación sea consistente. La altura de los puntos está referida al nivel medio del mar, mareógrafo de Mar del Plata (Datum Vertical Local). Se considera consistente para la comparación. La provincia tiene 700 puntos fijos altimétricos distribuidos en 18 líneas de nivelación. (IGM, 1979, IGM 1983; Galván et al, 2006; IGM 2009) (Ver Figura 5, el fondo de la Figura es el SRTM DEM).

3.2 Red POSGAR 07 IGN

La red POSGAR 2007 es el Marco de Referencia Geodésico Nacional Argentino. La red está referida al ITRF 05 Época 2006.632. El sistema de referencia de las posiciones horizontales de los puntos se considera consistente para la comparación. Las alturas elipsoidales de la red POSGAR 07 se transforman a alturas físicas usando el modelo EGM96 (Lemoine et al., 1998) para hacerlas compatibles con las alturas del SRTM 90m DEM ver.4.1 que utiliza como superficie de referencia para las alturas dicho modelo gravitacional (Hirt, C et al., 2010). Se

estima que EGM96 ajusta a las alturas físicas en puntos de nivelación GPS con una desviación estándar de ± 0.61 m para la República Argentina (Tocho et al., 2009). La provincia tiene 49 puntos fijos espacialmente bien distribuidos y con una precisión de ± 0.005 m (<http://ign.gob.ar/posgar2007/redposgar>) (Ver Figura 5).

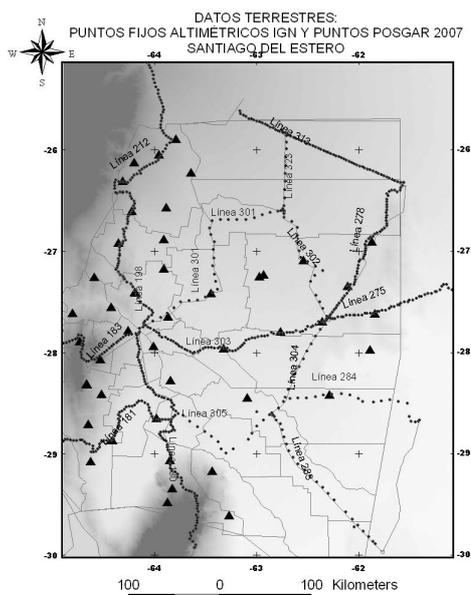


Figura 5: Datos Terrestres. ▲ Puntos POSGAR 07. ● Puntos Nivelación IGN.

4 COMPARACION DEL DEM CON DATOS TERRESTRES.

La comparación se realiza sobre puntos terrestres cuya posición debe estar referida al mismo sistema y tener asegurada la exactitud en su determinación (Felicísimo, 1999). De igual modo la componente de altura debe estar referida a la misma superficie.

La evaluación del DEM se realizó mediante el cálculo de los errores usando la ecuación 2, (Felicísimo, 1999):

$$H^{ERROR} = H^{DEM} - H^{DAT} \quad (2)$$

H^{ERROR} es el error o diferencia de alturas; H^{DEM} es la altura del DEM; H^{DAT} es la altura de los puntos terrestres.

5 RESULTADOS

La estadística descriptiva de los errores calculados con la ecuación 2 para los 716 puntos

de la red de nivelación IGN se presenta en la Tabla 2. Se observa que el SRTM tiene una DESV EST de 18.0 m (Tabla 2).

TABLA 2: Estadísticos de la comparación con los 716 puntos de nivelación. Unidades en metros.

ESTADISTICOS	(m)
PROMEDIO	6.6
MAX	253.9
MIN	-57.3
DESV EST	18.0

La gráfica de frecuencia de la Figura 6 muestra una curtosis elevada en la distribución para el modelo SRTM. Además presenta sesgo negativo. La moda para el SRTM es de -3.8 m.

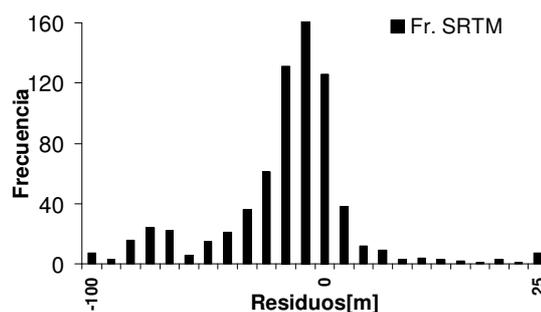


Figura 6: Distribución de los errores entre los puntos de nivelación y el SRTM DEM.

La estadística descriptiva de las diferencias calculadas con la Ecuación 2 en los 52 puntos POSGAR 07 figura en la Tabla 3. Es evidente el buen ajuste del modelo SRTM con una DESV EST de 1.9 m.

TABLA 3: Estadísticos de la comparación con los 52 puntos POSGAR 07. Unidades en metros.

ESTADISTICOS	(m)
PROMEDIO	1.8
MAX	5.3
MIN	-6.2
DESV EST	1.9

La gráfica de frecuencia de la Figura 7 muestra un comportamiento similar en cuanto a curtosis y sesgo respecto de las frecuencias de la Figura 6. Análogamente la gráfica de frecuencia evidencia un desplazamiento del centro de distribución del modelo.

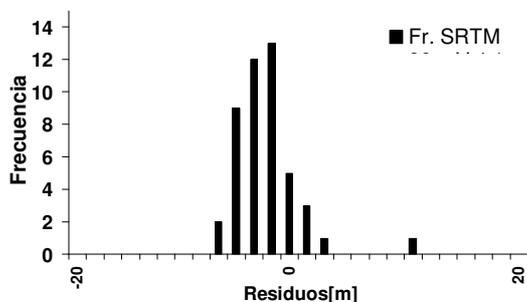


Figura 7: Distribución de las diferencias entre los puntos POSGAR 07 y el SRTM 90m DEM.

La DESV EST de los puntos POSGAR 2007 presentan un mejor ajuste con un valor de 1.9 m versus la DESV EST de 18.0 m para el análisis realizado sobre los puntos de nivelación.

En base al buen resultado obtenido con la red POSGAR07, en la Figura 8 se presenta una clasificación de los errores que surge de la comparación con el SRTM DEM. Resulta claro que los errores son predominantemente pequeños para la provincia. Los errores más elevados se presentan en zonas de topografía elevada. Total 4 puntos.

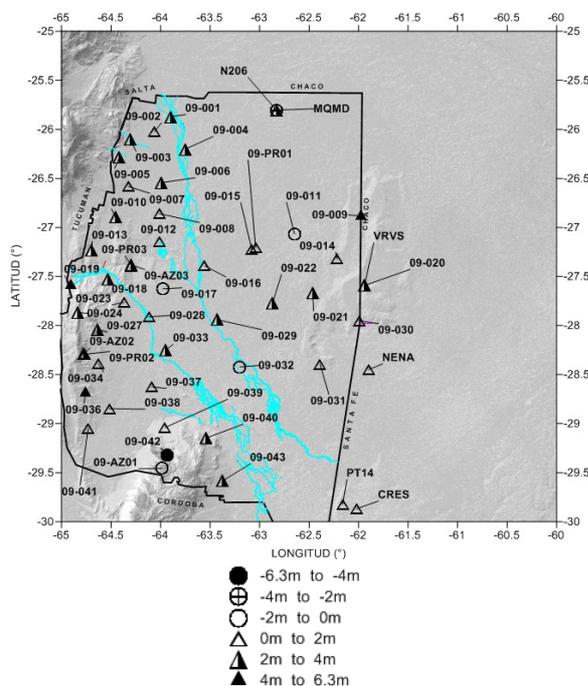


Figura 8: Clasificación de errores entre los puntos POSGAR 07 y el SRTM 90m DEM.

La Tabla 4 muestra la cantidad de puntos y las magnitudes de los errores relacionados con los resultados presentados en la Figura 8.

TABLA 4: Estadísticos de la comparación con los 52 puntos POSGAR 07. Unidades en metros.

MIN (m)	MAX (m)	%	CANT	SIMBOLO
-6.3	-4.0	2	1	●
-4.2	-2.0	2	1	⊕
-2.0	0.0	8	4	○
0.0	2.0	40	21	△
2.0	4.0	42	22	□
4.0	6.3	6	3	▲

En virtud de los resultados obtenidos para la red de nivelación se infiere que la exactitud en la posición no está asegurada. En consecuencia se mejora la posición de los puntos de nivelación con el uso de Google Earth™. Esta metodología permite mejorar la posición de los puntos de nivelación. Los sistemas de referencia son compatibles. A este nuevo conjunto de datos se lo denomina en la Tabla 5 como red de nivelación de posición mejorada.

TABLA 5: Desviación estándar para los diferentes datos terrestres.

PUNTOS TERRESTRES	DESV EST (m)
RED NIVELACION	18.0
RED NIVELACION (Posición Mejorada)	3.5
RED POSGAR07	1.9

Se observa en la Tabla 5 que el resultado de la red de nivelación se destaca cuando la posición de los puntos se mejora. En consecuencia se advierte que la exactitud en la posición de los puntos de nivelación es inexacta y variable. El resultado de la red POSGAR 07 es mejor.

Con la finalidad de profundizar el análisis del comportamiento del modelo en zonas de características topográficas similares se calcula un mapa de pendientes para la provincia.

Se usa para el cálculo de las pendientes la ecuación 3 de cuatro puntos (Moore, 1993) porque se considera adecuada y suficiente a los

finés de caracterizar diferentes zonas en el Mapa de Pendientes (Figura 9) para la zona de estudio.

$$S_T \approx \frac{360}{2\pi} \cdot \arctan \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{z_E - z_W}{2 \Delta x}\right)^2 + \left(\frac{z_N - z_S}{2 \Delta y}\right)^2} \right] \quad (3)$$

S_T es el ángulo expresado en grados. La variación es de 0 grados (horizontal) y de 90 grados (vertical); z_E es la altura del nodo próximo hacia el este del nodo de la grilla, cuya pendiente, se desea calcular; z_W es la altura del nodo próximo hacia el oeste del nodo de la grilla, cuya pendiente, se desea calcular; z_N es la altura del nodo próximo hacia el norte del nodo de la grilla, cuya pendiente, se desea calcular; z_S es la altura del nodo próximo hacia el sur del nodo de la grilla, cuya pendiente, se desea calcular; Δx es la distancia entre el nodo de la grilla y el vecino en el sentido este – oeste; Δy es la distancia entre el nodo de la grilla y el vecino en el sentido norte - sur.

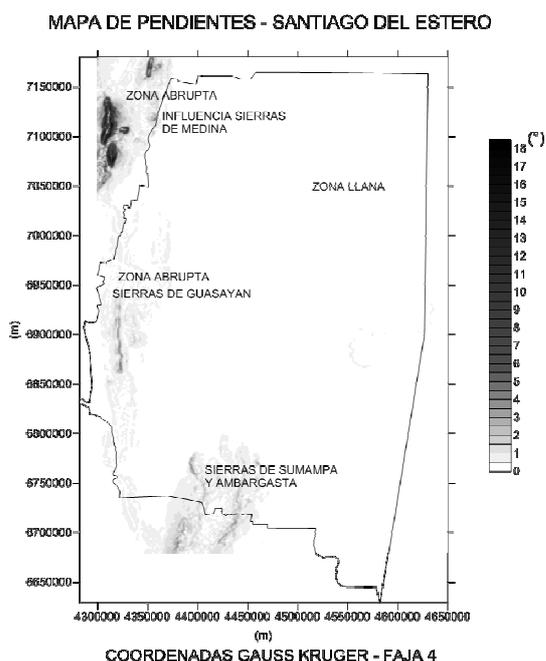


Figura 9: Mapa de pendientes para la provincia de Santiago del Estero, expresado en grados en escala de colores.

Se advierte claramente la presencia de dos zonas de características topográficas similares. Una zona llana que es predominante para la provincia y una zona abrupta que coincide con la presencia de elevaciones hacia el noroeste, oeste y sudoeste de la provincia. Se calculan los estadísticos para

ambas zonas contrastados con la red POSGAR 07 y los resultados se presentan en la Tabla 6.

TABLA 6: Estadísticos para la zona llana y la zona abrupta.

ESTADISTICOS (m)	ZONA LLANA	ZONA ABRUPTA
PROMEDIO	1.8	1.8
MAX	5.3	4.3
MIN	-0.8	-6.2
DESV EST	1.4	2.4

Los estadísticos de la Tabla 6 muestran que el SRTM 90 m DEM tiene un mejor comportamiento en la zona llana que en la zona abrupta.

6 CONCLUSIONES

La DESV EST del SRTM 90 m DEM es mejor en los puntos POSGAR 07 (1.9 m) que en los puntos de nivelación (18.0 m). Cuando se mejora la posición de los puntos de nivelación la desviación estándar se reduce en un factor mayor a cinco. Esto se explicaría por la inexactitud en las posiciones horizontales de los puntos de nivelación originales que exceden a la transformación entre sistemas de referencia. Esto implica la necesidad de continuar con la georreferenciación precisa de los mismos. Si se profundiza el análisis del DEM con la red POSGAR 07 que asegura la exactitud de las posiciones se puede concluir que en zonas llanas el modelo ajusta casi dos veces mejor que en zonas abruptas.

Los errores verticales esperados para el SRTM 90 m DEM son de 16 m en módulo. Los errores verticales se encuentran por debajo de los esperados en más de 11 veces en la zona llana y en más de 6 veces en la zona abrupta para los puntos POSGAR 07 analizados. El modelo SRTM 90 m, presenta un muy buen ajuste en la provincia de Santiago del Estero.

Las actividades futuras estarán orientadas a la obtención de un DEM corregido y al cálculo de un modelo mejorado en base al conjunto de datos correspondientes a la red POSGAR 07 de acuerdo a los resultados obtenidos por el presente trabajo.

El SRTM 90 m DEM mejorado representará un avance en la disposición de datos de altura para una zona con poca infraestructura geoespacial tanto para la provincia de Santiago del Estero como para la región.

7 REFERENCIAS

- EL-SHAIMY, N. VALEO, C. HABIB, A. "Digital Terrain Modeling. Acquisition, Manipulation, And Application". ARTECH HOUSE, INC. 69-157. (2005).
- Hirt C, Filmer MS, Featherstone WE. *Comparisons and validation of the recent freely-available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia.* 2009.
- Bolten A, Waldhoff G. *Error estimation of ASTER GDEM for regional applications-comparisons to ASTER DEM and ALS elevation models.* 2010.
- Tom G. Farr, Paul A. Rosen, Edward Caro, Robert Crippen, Riley Duren, Scott Hensley, Michael Kobrick, Mimi Paller, Ernesto Rodriguez, Ladislav Roth, David Seal, Scott Shaffer, Joanne Shimada, Jeffrey Umland, Marian Werner, Michael Oskin, Douglas Burbank, and Douglas Alsdorf. "The Shuttle Radar Topography Mission". Received 13 September 2005; revised 27 September 2006; accepted 14 November 2006; published 19 May 2007. Farr, Tom G. & et al, 2007.
- Reuter HI, Nelson A, Harvis A. *An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data.* 2007.
- Felicísimo Angel M. *Modelos Digitales del Terreno.* 1994
- Felicísimo Angel M. *Modelos Digitales del Terreno.* 1999.
- <http://www.etsimo.uniovi.es/feli>.
- Zakatov, P.S., *Curso de Geodesia Superior*, Rubiños -1860 S.A. Madrid, 1997.
- Torge, W, *Geodesia*, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1983.
- Torge, W, *Geodesy*, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2001.
- Del Cogliano, D., *Modelado del Geoide con GPS y Gravimetría. Caracterización de la estructura Geológica de Tandil.* Tesis Doctoral, UNR, 2006.
- Becek, K. *Investigation of elevation bias of the SRTM C and X band digital elevation models.* Beijing. 2008.
- Tocho, C. y Pacino, M. C. *Evaluación del modelo geopotencial terrestre EGM2008 en Argentina.* Reunión Científica AAGG 2009.
- Instituto Geográfico Militar. *100 Años en el Quehacer Cartográfico del País.* pp 112. 1979.
- Instituto Geográfico Militar. *Guía de la República Argentina para Investigaciones Geográficas.* pp 119-120. 1983.
- Heiskanen, W.A., Moritz, H., *Physical Geodesy.* W.H.Freeman, San Francisco. 1967.
- IGM. *130 AÑOS IGN.* 2009.
- Galván L., Infante C., Goitea I., *Georreferenciación de puntos altimétricos IGM para la provincia de Santiago del Estero,* GEOACTA. AAGG. Vol. 32. pp 217- 222. 2007.
- Galván L., Infante C., Goitea I., Lauría E., Ramos R. *Evaluación del modelo SRTM 90 en alturas IGM para el área del río Dulce de la provincia de Santiago del Estero.* pp III-1 a III-6. 2008.
- Galván, Lucrecia; Infante Claudia; Goitea Iber; Laitán, Hector; Duro, Javier; Pirola, Marcelo; Luna, Juan Pablo & Lauría, Eduardo; Ramos Rubén. *Evaluación del modelo SRTM 90m en alturas IGM para la provincia de Santiago del Estero.* 2009.
- <http://www.ign.gob.ar/posgar2007/redposgar>
- <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>
- <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- <http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>
- <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp>
- <http://isd.c.gfz-potsdam.de/index.php?module=pagesetter&func=viewpub&tid=1&pid=34> Reuter HI, Nelson A, Harvis A. *An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data.* 2007.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación "Análisis y Aplicación de los Modelos Digitales de Elevación (DEM) y Modelos Geopotenciales Globales (MGG) para la Provincia de Santiago del Estero", financiado por el Consejo de Investigación de Ciencia y Técnica (CICYT) de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).