

GESIG *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*. Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Programa de Docencia e Investigación en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad Nacional de Luján, Argentina. <http://www.gesig-proeg.com.ar> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 8, Número 8, 2016, Sección II: Metodología. pp. 34-55

COMPARACIÓN DE DEM GENERADOS A PARTIR DE DISTINTAS FUENTES DE DATOS. CUENCA DEL ARROYO SAUCE CORTO, SISTEMA DE VENTANIA, ARGENTINA

Alicia María Campo^{1,2} - Jorge Gentili^{1,2} - Andrea Silva¹

¹Depto. de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur - ²CONICET
12 de octubre 1198, 4^{to} piso - (B8000CTX) Bahía Blanca - Argentina
amcampo@uns.edu.ar - jogentili@uns.edu.ar - asilva@uns.edu.ar

RESUMEN

La distribución espacial de altitudes de un DEM define la topografía y de él se derivan atributos de interés para la modelación ambiental. En la cuenca del arroyo Sauce Corto los procesos de inundación y anegamiento constituyen un peligro para la población y sus actividades. La modelación hidrológica-hidráulica para el análisis de la problemática requiere de un DEM como base. Para el área de estudio se dispone de DEM generados desde fuentes diversas y es deseable conocer sus diferencias a fin de efectuar una selección adecuada. Por ello, el objetivo del trabajo es comparar un DTM generado a partir de cartografía a escala 1:50.000 y los productos ASTER y SRTM en la cuenca del arroyo Sauce Corto. Se analizaron las diferencias altimétricas, de pendiente y orientación entre los DEM y se evaluaron mediante estadísticos de centralidad y dispersión. Se observa semejanza entre DTM y SRTM en términos altimétricos y morfológicos.

PALABRAS CLAVE: DTM, DSM, ASTER, SRTM, Cuenca del arroyo Sauce Corto

COMPARISON OF DEM GENERATED FROM DIFFERENT DATA SOURCE. SAUCE CORTO BASIN, VENTANIA SYSTEM, ARGENTINA

ABSTRACT

The spatial distribution of a DEM altitude defined topography and attributes of interest he environmental modeling derived. In Sauce Corto basin flooding and waterlogging processes are a hazard to the population and its activities. Hydrologic-hydraulics modeling for the analysis of the problem, DEM is requires as base. For the study area are available DEM generated from various sources and it is desirable to know their differences in order to make a proper selection. Therefore, the aim of this work is to compare a DTM generated from

1:50.000 scale mapping and SRTM and ASTER products in the Sauce Corto basin. The topographical differences, slope and orientation between the DEM were analyzed and evaluated by statistical centrality and dispersion. Similarity between DTM and SRTM observed in altimetric and morphological terms.

KEY WORDS: DTM, DSM, ASTER, SRTM, Sauce Corto basin

INTRODUCCIÓN

La topografía del terreno es un factor en la génesis y evolución de muchos procesos que ocurren en todas las esferas del sistema terrestre. La distribución espacial de altitudes que contiene un DEM (*Digital Elevation Model* o MDE (en español: Modelo Digital de Elevaciones) define la topografía del terreno y de él se derivan atributos tales como: altitud, pendiente, aspecto y curvatura. Estos atributos son de interés fundamental para el ordenamiento del territorio y la modelación ambiental en áreas como geomorfología, geología, ecología y particularmente en hidrología (Felicísimo, 1994; Wu *et al.*, 2008). Ejemplos de aplicación de DEM en esta última línea son los trabajos de Diez Herrero (1999); Maestro-Cano *et al.* (2003); Diez Herrero *et al.* (2006); Rulli *et al.* (2007); Petroselli *et al.* (2007); Sanders (2007); Lastra *et al.* (2008); Merwade *et al.* (2008); Ozdemir y Bird (2009); Cook y Merwade (2009); Matsunaga *et al.* (2009) y Grimaldi *et al.* (2009). La importancia de los DEM en la modelización ambiental está vinculada a su potencial aplicación con fines explicativos y predictivos (El-Sheimy *et al.*, 2005).

Un Modelo Digital de Elevación es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de alturas referidas a un determinado *datum*. De esta denominación genérica pueden diferenciarse los términos DTM (*Digital Terrain Model*) que hace referencia a un DEM en el que se representa solo la morfología del terreno (no está la información de las alturas de los objetos culturales ni de la vegetación) y DSM (*Digital Surface Model*) que incluye en su representación la altura de estos y los restantes objetos que están sobre la superficie de la tierra (El-Sheimy *et al.*, 2005; Hall y Tragheim, 2010).

Los DEM pueden generarse a partir de datos de documentos cartográficos (curvas de nivel y/o puntos de elevación), fotogrametría (a partir de fotografías aéreas e imágenes de alta resolución en el rango óptico del espectro electromagnético), interferometría (a partir de imágenes SAR) y, más recientemente, mediciones de elevación directas de imágenes LIDAR. El actual desarrollo de instrumental y metodologías para la adquisición y procesamiento de datos de altura e información del terreno está asociado a una creciente demanda en los requerimientos de precisión debido a que la calidad de los datos topográficos disponibles condiciona la capacidad de entender y modelar los procesos (Jarvis *et al.*, 2004).

Las curvas de nivel y los puntos de elevación presentes en las cartas topográficas constituyen la fuente de datos para la generación de modelos digitales del terreno. El problema se plantea en estudios para los cuales no se dispone de un DTM del área de interés, ni de la información de altura existente en documentos cartográficos a la escala que requiere el trabajo en formato digital para su generación. En estos casos, el tamaño del área, su rango altitudinal y la complejidad topográfica de la superficie, que influyen en la cantidad y longitud de las curvas

de nivel, constituyen una limitante. Actualmente existen modelos digitales de elevación provenientes de sistemas satelitales con cobertura global, mayor accesibilidad y menor costo que pueden ser usados para la modelación ambiental. Si bien cada uno de estos productos tiene un rango de precisión definido es deseable validar cada uno de ellos con la información disponible en cada área de trabajo para decidir su uso (Jarvis *et al.*, 2004).

Validaciones de los modelos ASTER y SRTM a escala local constituyen el objeto de numerosas publicaciones en diversas partes del mundo. A modo de ejemplo, se pueden citar para el caso de ASTER a Hall y Tragheim (2010) quienes compararon el DSM ASTER con un DSM derivado de datos InSAR en un pequeño sector de Gran Bretaña. Para SRTM, Jarvis *et al.* (2004) compararon su precisión con DTM originados en cartografía a escala 1:50.000 en Honduras, mientras que Gorokhovich y Voustianiouk (2006) evaluaron la precisión de SRTM-CGIAR para localidades de Estados Unidos y Tailandia utilizando como base puntos GPS. Por su parte, Roa Lobo y Kamp (2008) evaluaron y compararon los modelos ASTER y SRTM en la cordillera de Mérida, Venezuela. En la vertiente suroriental del sistema de Ventania (cuenca media del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina) Casado *et al.* (2010) evaluaron la calidad de una serie de DTM's generados a partir de curvas de nivel con resoluciones espaciales de 10 m, 25 m, y 50 m, siguiendo cuatro métodos de interpolación: *Triangulated Irregular Network* (TIN), *Inverse Distance Weighting* (IDW), *TopoGrid* (TG) y *Ordinary Kriging* (OK). En el mencionado trabajo se identificó a *TopoGrid* como el algoritmo de interpolación más preciso en cuanto a calidad altimétrica y el que mejor representa el relieve de la zona.

En la cuenca del arroyo Sauce Corto ocurren procesos de inundación y anegamiento de forma recurrente que constituyen un peligro para la población y sus actividades. La topografía (y sus dimensiones derivadas) es una de las variables que interviene en la evolución de ambos fenómenos. La modelación a los fines del análisis de la problemática requiere la utilización de un DEM. Para el área de estudio, la información altimétrica digital para la generación de un DTM está disponible. No obstante es deseable conocer las diferencias entre éste y otros modelos generados a partir de diversas fuentes de datos de altura existentes. En este último punto se sustenta la originalidad del trabajo, ya que para el sector propuesto no se han desarrollado estudios comparativos que involucren DEM obtenidos de datos de satélites.

El objetivo del trabajo es comparar un DTM generado a partir de cartografía a escala 1:50.000 y los productos ASTER y SRTM obtenidos por sistemas satelitales ópticos y radar respectivamente en diferentes áreas de la cuenca del arroyo Sauce Corto. El análisis comparativo en el dominio espacial incluye la cuantificación de las diferencias altimétricas, de gradiente y de orientación para evaluar la exactitud y precisión entre los DEM mediante estadísticos de centralidad y dispersión respectivamente. La importancia de la comparación de los productos obtenidos desde plataformas satelitales es que permite identificar la mejor alternativa para el modelamiento ambiental en ausencia de datos de altura en documentos cartográficos que permitan generar un DTM.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del arroyo Sauce Corto se localiza en el suroeste de la provincia de Buenos Aires y sus nacientes se encuentran en la vertiente nororiental del sistema de Ventania (sierras de las Tunas, de la Ventana, de Curamalal y de Bravard). Presenta un desarrollo predominante en sentido sur-suroeste-nor-noreste (asociado a la pendiente regional que impone el sistema de Ventania) en dirección a las lagunas Inchauspe y de Juancho (cuenca Carhué – Vallimanca)

(Fig. 1). La cuenca presenta una altura máxima de 975 msnm y pendientes que varían en el rango entre 79,8 ° y 0 ° (áreas planas) (Gentili, 2012). En cuanto a la topografía, en los sectores serranos de mayor altitud, el relieve es muy abrupto, con vertientes de elevados gradientes vinculados a profundos y angostos valles. Luego se presenta un relieve con distintos niveles de erosión que dan lugar a cumbres de cerros redondeadas y aplanadas, separadas por amplios valles. Por último, fuera del piedemonte de las sierras, dominan áreas planas (Harrington, 1947; 1980).

La geomorfología de la cuenca presenta diferencias marcadas según el sitio de la misma. En la cuenca alta, predominan formas erosivas (terrazas y pedimentos) y agradacionales (planicies, abanicos y bajadas aluviales) originadas por procesos fluviales. También los procesos geomórficos de remoción en masa dejaron su impronta: flujos densos (abanicos y bajadas aluviales), soliflucción (lóbulos y “terrazuelas”), deslizamientos y caídas y reptación (conos) (Pereyra y Ferrer, 1995).

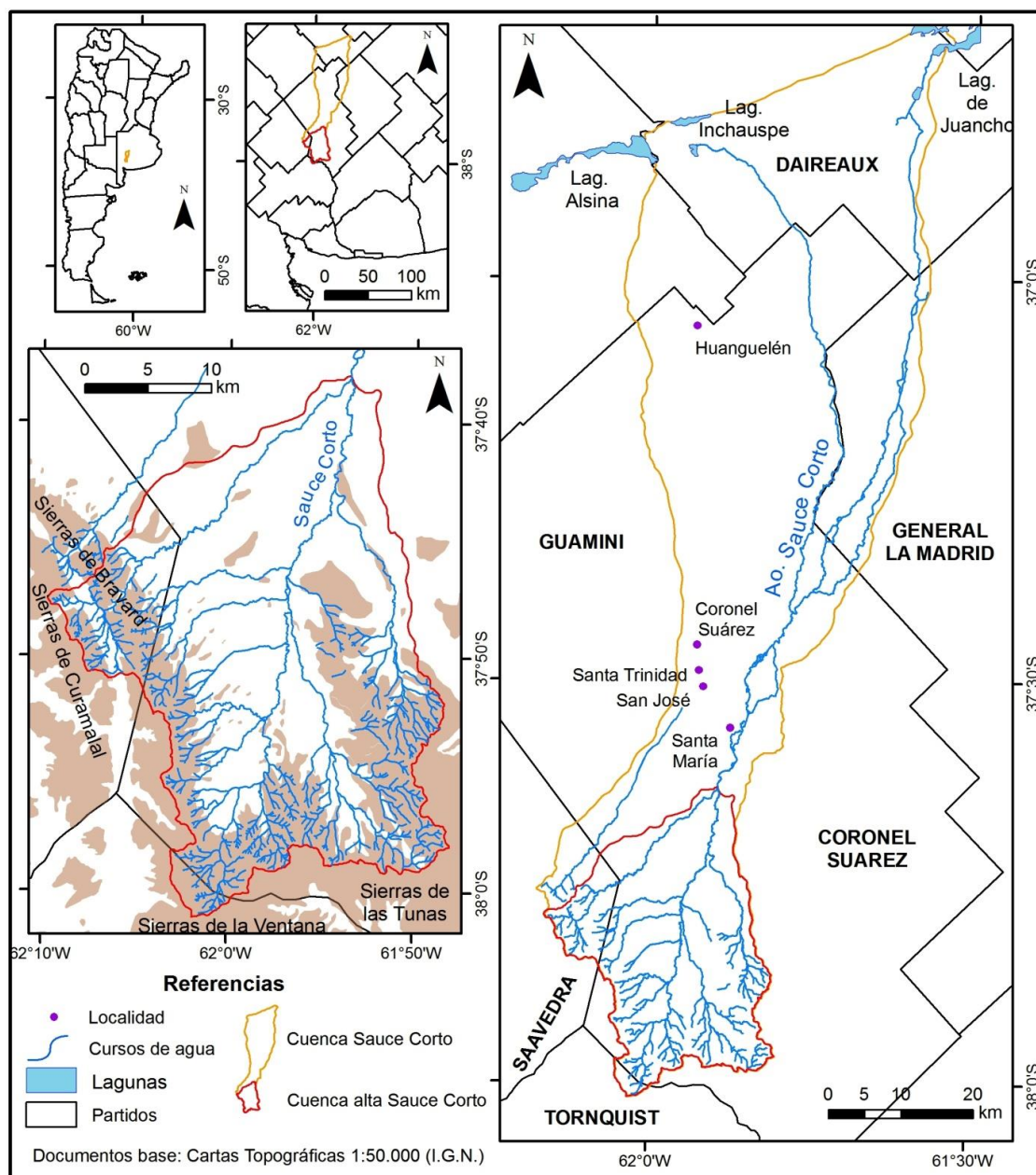


Figura 1. Área de estudio. (Fuente: Modificado de Gentili, 2012).

En la cuenca baja predominan las cubetas y planicies loésicas, originadas por procesos eólicos erosivos y agradacionales respectivamente. El paisaje característico en este sector de la cuenca del arroyo Sauce Corto es el de ondulaciones amplias y suaves en las que se encuentran depresiones cerradas con diferencias geomórficas y de edad (Tricart, 1973; González Uriarte *et al.*, 1988; Pereyra y Ferrer, 1995).

MATERIALES Y MÉTODOS

En relación con la variabilidad topográfica, con la diversidad geomorfológica y con elementos de la superficie del área de estudio, se seleccionaron como áreas de muestreo, tres sectores dentro de la cuenca con el fin de aprehender la complejidad y de ese modo efectuar una evaluación representativa de los DEM. Cada una de dichas áreas presenta diferentes características que condicionan la coordenada z de los modelos digitales de elevación.

1. El primero de ellos corresponde a la denominada *Cuenca alta del arroyo Sauce Corto (CASC)*, de 770 km² (Fig. 2). Aquí se conjugan sectores elevados de las sierras y áreas de escaso relieve. Existen vertientes de pendientes abruptas con diferentes orientaciones que generan un número considerable de variaciones topográficas. Es un área rural, en la que no existen centros poblados. La vegetación arbórea es de escasa densidad y solo aparece entorno a los cascos de las estancias, junto a alambrados y en las márgenes de arroyos. La equidistancia de la cartografía base es de 10 metros en la zona de montaña y 5 metros en la parte distal de la cuenca.

2. Dentro del primer sector, se consideró una segunda área de testeo de 77,4 km² (aproximadamente un 10 % de la primera) que se denominó *Área cercana al cierre de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto* (Fig. 7). Este sector, que se localiza fuera del área serrana, tiene menores gradientes de pendientes que el anterior y el uso del suelo es exclusivamente agrícola-ganadero. La cartografía base tiene una equidistancia de 5 metros.

3. Por último, un tercer sector, también de 77,4 km², situado aguas abajo de la cuenca alta del arroyo, que corresponde a la *Colonia Santa María y alrededores* (Fig. 9). Es un área plana, pero en contraste con la anterior, tiene un pequeño sector urbanizado y es atravesada por rutas y vías férreas. En este caso, la equidistancia en la cartografía base es de 2,5 metros.

Conjuntos de datos

En el presente estudio se utilizaron DEM's provenientes de tres fuentes de datos:

Un DTM derivado de curvas de nivel y puntos de altura digitalizados de cartografía a escala 1:50.000 (I.G.N.¹) (denominado a los efectos del presente trabajo DTM50000). Las cartas topográficas, fuente para la obtención de los datos fueron: Tornquist, Sierra de la Ventana, Estancia Gran Chaco, Sierra de las Tunas, Estancia Los Moros, Arroyo Sauce Corto, Estancia Curamalan y Bathurst. Las alturas de estos documentos son ortométricas, con *datum* vertical en el cero del nivel del mar según el mareógrafo de la localidad de Mar del Plata (Argentina). Para generar el DTM se aplicó el interpolador *Topo to Raster*, provisto por ArcGIS 9.1, con un tamaño de celda de 30 metros de lado. Este método es multiresolución (local y global) diseñado para la creación de DEM corregidos con fines hidrológicos ya que permite incluir en

¹ Instituto Geográfico Nacional

la interpolación las líneas de drenaje, los puntos acotados, las depresiones y las superficies cubiertas de agua. La selección de este método (es la implementación en ArcGIS 9.x y versiones posteriores del método *TopoGrid* de *ArcInfo Workstation 7.x*) está en relación con los resultados obtenidos por Casado *et al.* (2010). En dicho trabajo, se evaluó al interpolador como el más preciso en términos altimétricos y el que más fielmente representa al relieve en un sector del sistema de Ventania.

Los DSM utilizados como referencia son los generados por imágenes obtenidos por sistemas satelitales ópticos y radar provenientes del *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) y del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) respectivamente cuyas características se presentan en la Tabla 1.

Producto	ASTER-GDEM	SRTM-CGIAR
Misión	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)	Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)
Generación	NASA/METI	NASA/CGIAR
Proyección	Coordenadas Geográficas	Coordenadas Geográficas
Datum Horizontal	WGS84	WGS84
Datum Vertical	EGM96 (Earth Gravitational Model 1996)	EGM96 (Earth Gravitational Model 1996)
Unidades Verticales	Metros	Metros
Resolución Espacial	~ 30 metros (1 arc-seconds)	~ 90 metros (3 arc-seconds)
Precisión Vertical	7-14 metros	10 metros

Tabla 1. Principales características de los DSM generados a partir de datos satelitales. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014 a partir de www.usgs.gov y www.cgiar-csi.org).

Técnicas de análisis

En cada área test se analizaron visualmente los tres DEM para identificar cómo fue capturada la morfología del sector. Luego se evaluó la diferencia entre los DEM en términos de exactitud y precisión a partir del cálculo de estadísticos de centralidad y dispersión. Los estadísticos se trabajaron con la diferencia altimétrica entre cada DSM y DTM50000, considerando a los DSM como referencia en cada una de las comparaciones. Para el procesamiento no se realizaron cambios en la resolución de los productos satelitales a fin de conservar la información altimétrica original de los mismos. Los estadísticos se calcularon considerando LE95% para evitar la influencia de valores atípicos u *outliers* en los resultados finales.

La exactitud, entendida como medida de cercanía, se cuantifica como la diferencia entre un valor "verdadero" (en este caso el valor del DSM de referencia) y el valor contenido en el dato espacial (en este caso el valor del DTM50000) mediante el estadístico de centralidad *BIAS* (1). El *bias* o sesgo se asocia a la componente sistemática de error.

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(z_{i\ ref} - z_{i\ val})}{N} \quad (1)$$

Donde:

$z_{i\ ref}$ valor de altura en la celda i del DEM de referencia

$z_{i\ val}$ valor de altura en la celda i del DTM a validar

N número de celdas analizadas

La medida para evaluar la precisión entendida como medida de dispersión de los datos espaciales fue el Error Medio Cuadrático (RMSZ) (2). La precisión se vincula con la componente aleatoria del error.

$$RMSZ = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(z_{i\ ref} - z_{i\ val})^2}{N}} \quad (2)$$

Donde:

$z_{i\ ref}$ valor de altura en la celda i del DEM de referencia

$z_{i\ val}$ valor de altura en la celda i del DTM a validar

N número de celdas analizadas

En el área test correspondiente a la cuenca alta del arroyo Sauce Corto, para evaluar la inclinación, el error medio cuadrático se presenta en función de la tangente de la inclinación del terreno y para evaluar la orientación del terreno se utiliza el desvío estándar expresado como función de la tangente de la inclinación del terreno (Jacobsen, 2006). Los resultados se presentan en mapas de diferencias altimétricas, histogramas de frecuencias de diferencias altimétricas y gráficos rectangulares. Para todos los casos, el histograma de frecuencias se construyó a partir de la consideración de los valores comprendidos en LE95%, mientras que el mapa de diferencias altimétricas presenta la totalidad de los puntos analizados, incluidos los valores extremos.

El software utilizado para el análisis de los DEM fue DEMANAL. Dicho software realiza la comparación de las tres dimensiones de un DEM, tomando otro como referencia. Para el cálculo de las diferencias altimétricas entre ellos utiliza el método de interpolación bilinear. El análisis se complementó con controles de campo. Los productos cartográficos se realizaron con ArcGIS 10 y las tablas y gráficos con Microsoft Excel.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuenca alta del arroyo Sauce Corto (CASC)

El DTM generado y los DSM de referencia se presentan en la figura 2. En esta escala espacial, el análisis cualitativo permite observar diferencias en la definición de las grandes geformas existentes en el área. En el sector oeste y sur de la cuenca, donde se encuentran las áreas más elevadas de las sierras, se identifican claramente los angostos valles interserranos en los tres DEM analizados. vertiente abajo en dirección norte, en los sectores de cumbres redondeadas (superficies erosivas) comienzan a evidenciarse las diferencias entre los productos analizados. Las geformas mencionadas están claramente definidas en DTM y SRTM, mientras que en ASTER no se identifican. La situación descrita se repite en los sectores de menor gradiente de la pendiente hacia la salida de la cuenca alta, ya que en ASTER no se evidencia la morfología del amplio valle del arroyo Sauce Corto. En términos cuantitativos, se observan diferencias de altura en los extremos altimétricos de los respectivos rangos. ASTER muestra diferencias notables en su extremo inferior, muy por debajo de los valores de los otros productos. SRTM presenta en sus dos extremos valores similares a DTM50000 (Fig. 2).

Para la cuenca alta del arroyo Sauce Corto se analizaron un total de 812.458 valores de altura en cada una de las comparaciones. El 95 % de las diferencias altimétricas calculadas se encuentra en el rango $\pm 29,65$ metros para la comparación ASTER-DTM50000 y en el rango $\pm 23,5$ metros para la comparación SRTM-DTM50000 (Tabla 2). La exactitud en términos absolutos es mayor entre SRTM y DTM50000 (1,53 metros) presentando ambas confrontaciones un sesgo de distinto signo. En cuanto a la precisión, SRTM y DTM50000

evidencian un mejor ajuste (6,38 metros) en relación con ASTER y DTM50000 (10,59 metros). Se observa una importante influencia de la componente aleatoria en la precisión del DTM50000 respecto de ambos modelos de referencia en relación con los valores absolutos bajos de la componente sistemática de error.

	<i>BIAS</i>	<i>Desvío St.</i>	<i>RMSZ</i>	<i>LE95</i>	<i># Puntos</i>
ASTER-GDEM vs DTM50000	-2,54	10,29	10,59	29,65	812.458
SRTM-CGIAR vs DTM50000	1,53	6,20	6,38	23,5	812.458

Tabla 2. Estadísticos (m) para ambas comparaciones (considerando LE95%). (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

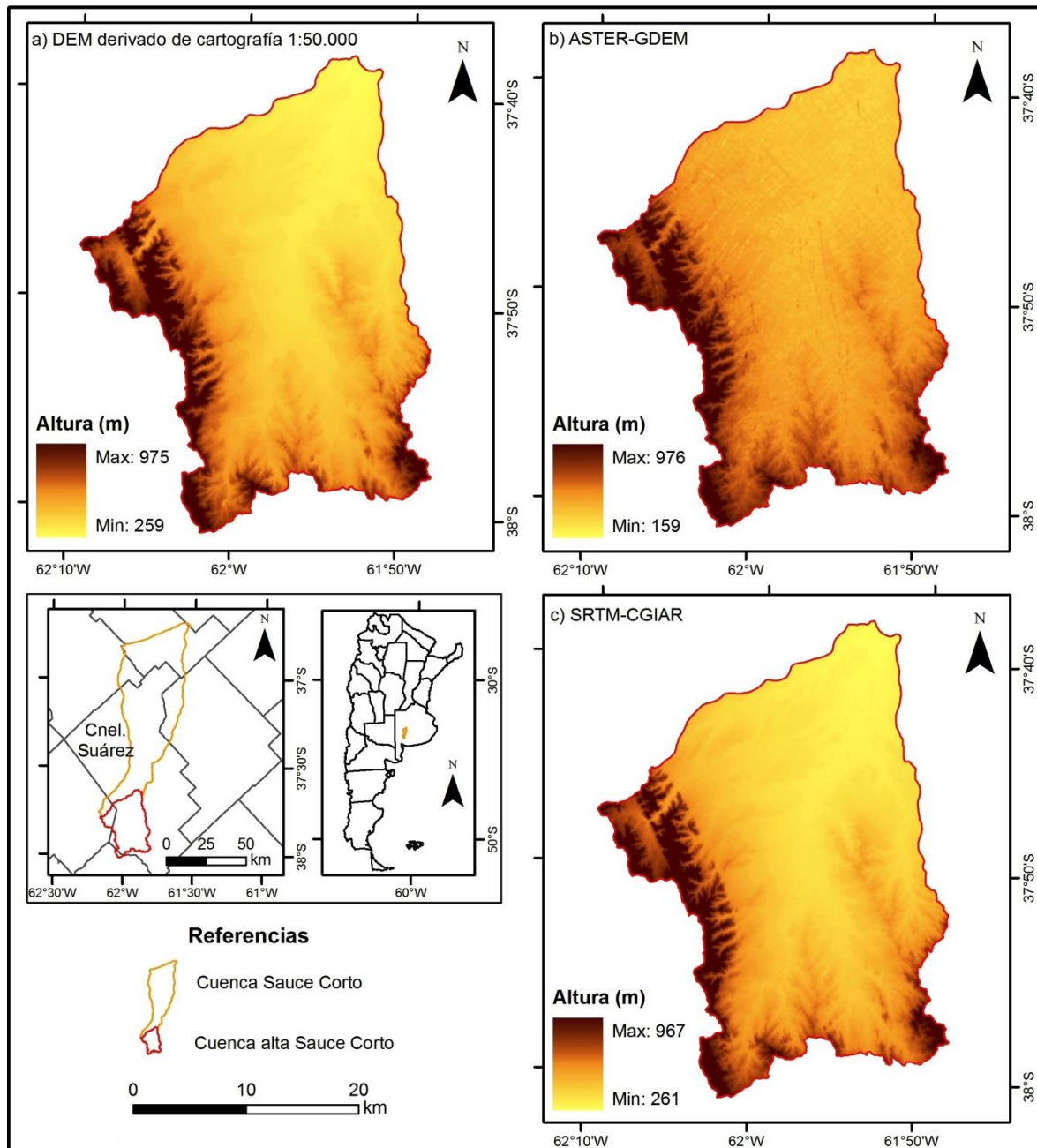


Figura 2. Modelos digitales de elevación de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (CASC). a) DTM derivado de cartas topográficas a escala 1:50.000, b) ASTER-GDEM y c) SRTM-CGIAR. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

En las figuras 3 y 4 se presenta la distribución espacial y el histograma de frecuencias de las diferencias altimétricas entre los DSM de referencia y DTM50000. Las diferencias positivas indican que el valor de altura del pixel de una posición absoluta en el DSM de referencia es mayor que el valor de altura del pixel que se encuentra en la misma posición en el DTM50000. En otras palabras, en ese punto del espacio, el DSM de referencia está por sobre el DTM50000. Por el contrario, cuando la diferencia es negativa el DTM50000 está por encima del DSM de referencia en dicho punto.

La distribución espacial de las diferencias altimétricas muestra similitudes entre ambas comparaciones. Los máximos valores absolutos de diferencias se encuentran principalmente en los sectores sur y oeste del área de estudio en coincidencia con las sierras donde se verifican las mayores variaciones en el gradiente y la orientación de las pendientes. A diferencia de la comparación con ASTER, la confrontación con SRTM muestra un mayor acuerdo entre las alturas en la parte más baja del área de estudio (Fig. 4). Gráficamente en los histogramas de frecuencias (Fig. 3 y 4) y numéricamente en el *BIAS* (Tabla 2), se puede observar que el modelo ASTER subestima las alturas respecto del modelo DTM50000 (sesgo hacia la izquierda) y SRTM sobrestima las alturas respecto de DTM50000 (sesgo hacia la derecha).

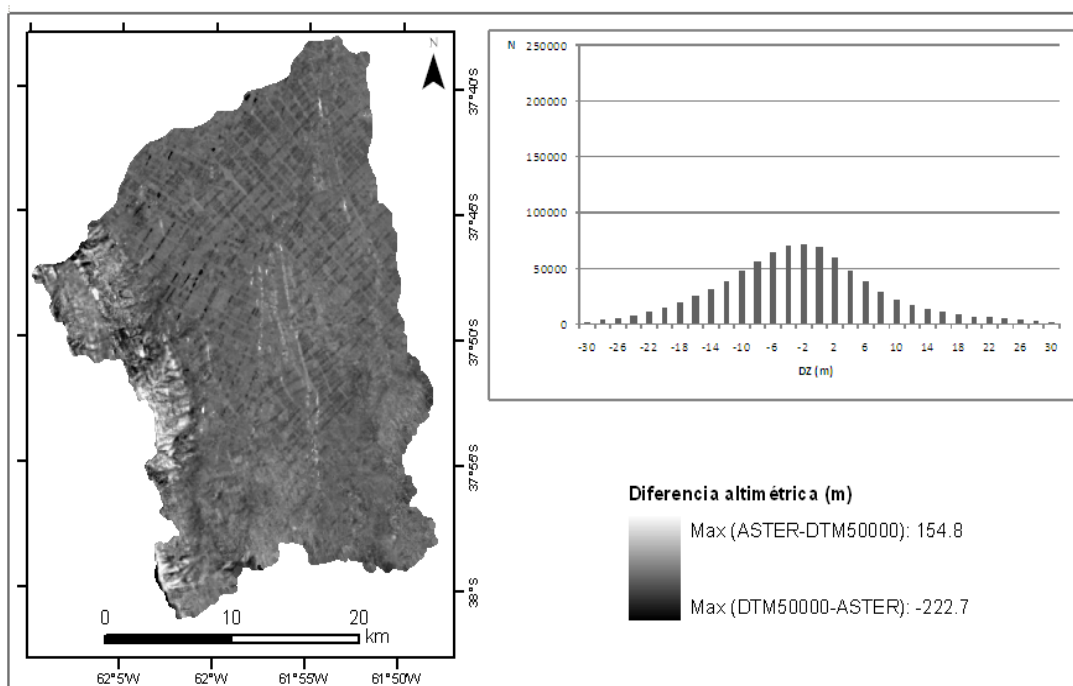


Figura 3. Distribución espacial e histogramas de frecuencia de las diferencias de altura entre ASTER-GDEM y DTM50000 para CASC. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

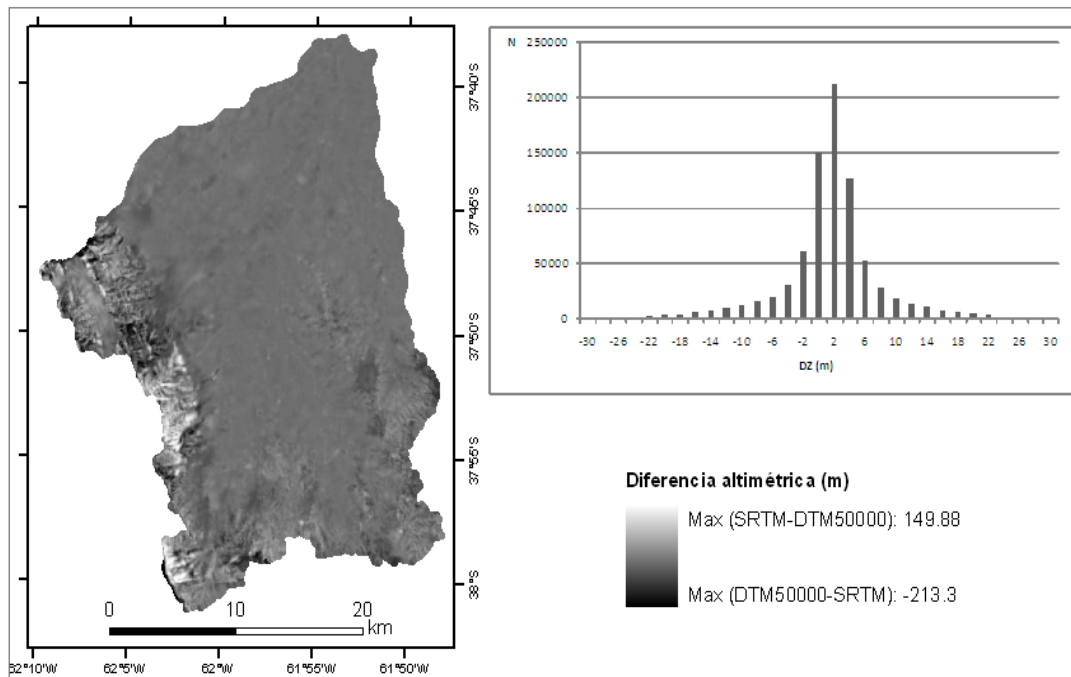


Figura 4. Distribución espacial e histogramas de frecuencia de las diferencias de altura entre SRTM-CGIAR y DTM50000 para CASC. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

La figura 5 muestra el error medio cuadrático de la comparación de ambos modelos en relación con rangos de gradiente de pendiente. El RMSZ, entre los DSM de referencia y DTM50000 muestra que, a excepción de la clase $[0,75; 0,8)$ (equivalente al rango $36,87^\circ - 38,7^\circ$) en la cual es mayor para SRTM, en el resto de los grupos de tangente de la pendiente ASTER tiene valores mayores de error medio cuadrático. La diferencia entre ambas confrontaciones es muy notoria en el caso de las áreas de menor gradiente (clase $[0; 0,05)$, pendientes menores a $2,86^\circ$) y el grupo comprendido por la clase $[0,7; 0,75)$ (rango $35^\circ - 36,87^\circ$) aunque el número de celdas en esta última clase no es representativo.

Es importante destacar que, en términos absolutos, el número de celdas acumulado entre las clases $[0,4; 0,45)$ y $[1,05; 1,1)$ para cada DSM (gradientes comprendidos entre $21,8^\circ$ y $47,73^\circ$) es inferior al 1 % de los valores procesados. Así, si se centra el análisis en los intervalos precedentes (por consiguiente más representativos), se aprecia para ambos productos satelitales un aumento del error medio cuadrático a diferente razón hasta $[0,25; 0,3)$ ($14,04^\circ - 16,7^\circ$) para ASTER y $[0,2; 0,25)$ ($11,3^\circ - 14,04^\circ$) para SRTM, registrándose luego un comportamiento estacionario en los valores del estimador (Fig. 5). En este último producto, es muy significativo el crecimiento del error de la primera clase a la segunda clase, donde se aprecia una duplicación del valor del estimador.

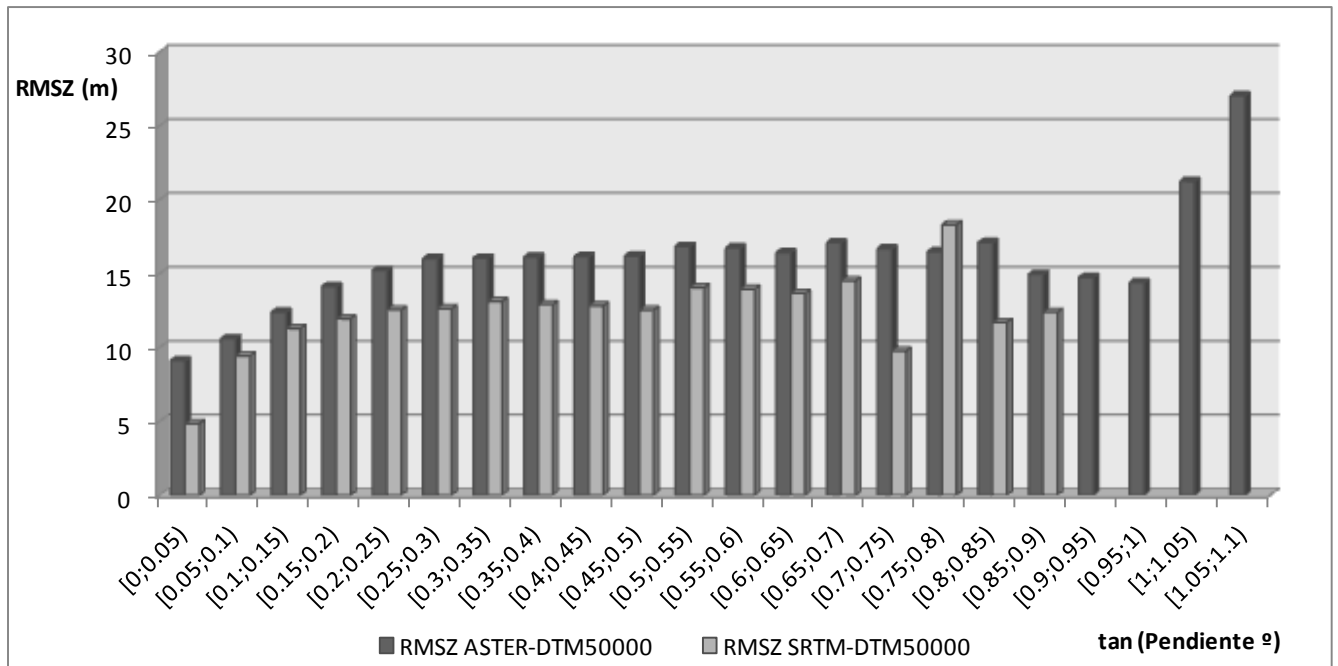


Figura 5. RMSZ de las diferencias de altura de acuerdo a intervalos de tangente de la pendiente. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

La precisión del gradiente y orientación de la pendiente se evaluó con el desvío estándar calculado como función de la tangente de la pendiente (SZ) (Fig. 6). Para ambos sensores los menores errores se observan en las pendientes menores a $5,7^\circ$. En dicho rango es preciso remarcar que para todas las orientaciones la comparación con ASTER registró valores próximos a 10 metros y la comparación con SRTM valores próximos a 5 metros.

Para el caso de ASTER (Fig. 6a), en las primeras cuatro clases (99 % de los valores analizados) las vertientes con orientación NE son las que presentan menor error, mientras que las orientaciones con mayores errores se alternan entre SE y S para la primera clase de gradientes, S para la segunda y tercera clase y SE y SW para la cuarta clase. En la comparación con SRTM (Fig. 6b) en las primeras cuatro clases, los menores valores de error corresponden a NW para la primera clase, N para la segunda y tercera y W para la cuarta. Las orientaciones con mayores errores se alternan entre N para la primera clase de gradientes, SE y S para la segunda, E para la tercera y E y NW para la cuarta clase.

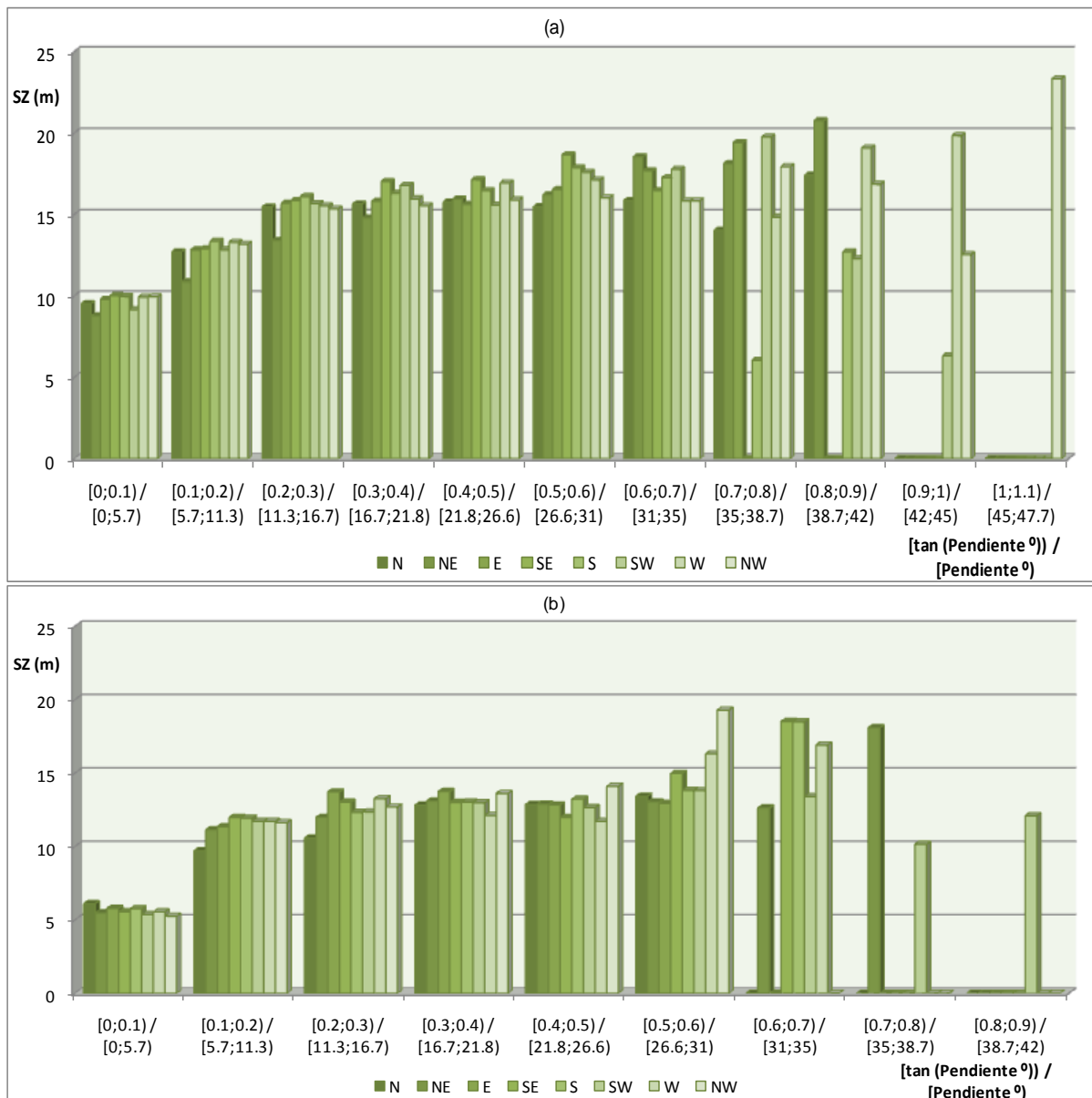


Figura 6. SZ de las diferencias de altura de acuerdo a la orientación y a la tangente de la pendiente para: a) ASTER-GDEM vs DTM50000 y b) SRTM-CGIAR vs DTM50000. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

Área cercana a la salida de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto

La figura 7 presenta los DEM del área de testeo. Nuevamente se observan claras diferencias en la definición de la geoformas y en los extremos altimétricos. En los modelos DTM y SRTM, independientemente de las diferencias originadas por el proceso de generación de cada DEM, se pueden identificar claramente las formas del terreno. Por el contrario, en el modelo ASTER no es posible distinguir las principales geoformas de la superficie en el sector, que pueden atribuirse al “ruido” descrito por Roa Lobo y Camp (2008). En el modelo SRTM, se observa el valle del arroyo Sauce Corto y en la parte central del mismo la respuesta de la vegetación arbórea en las márgenes del canal, con valores superiores a los del terreno en dichos sectores. En este sentido Kellndorfer *et al.* (2004) dan cuenta de la significativa sensibilidad de SRTM respecto de la estructura vertical de la vegetación. El registro de la vegetación está asociado a la corta longitud de onda de la Banda C (5,6 cm) del sensor. Las

ondas emitidas por el radar que son recibidas sobre áreas vegetadas se reflejan sobre la misma y no sobre la superficie del terreno. Desde el punto de vista altimétrico, DTM50000 y SRTM tienen extremos similares en sus respectivos rangos de altura. Por su parte, en el modelo ASTER no es posible identificar el valle y en términos cuantitativos, tiene para el sector un rango de variabilidad de alturas mayor, con diferencias notorias en ambos extremos.

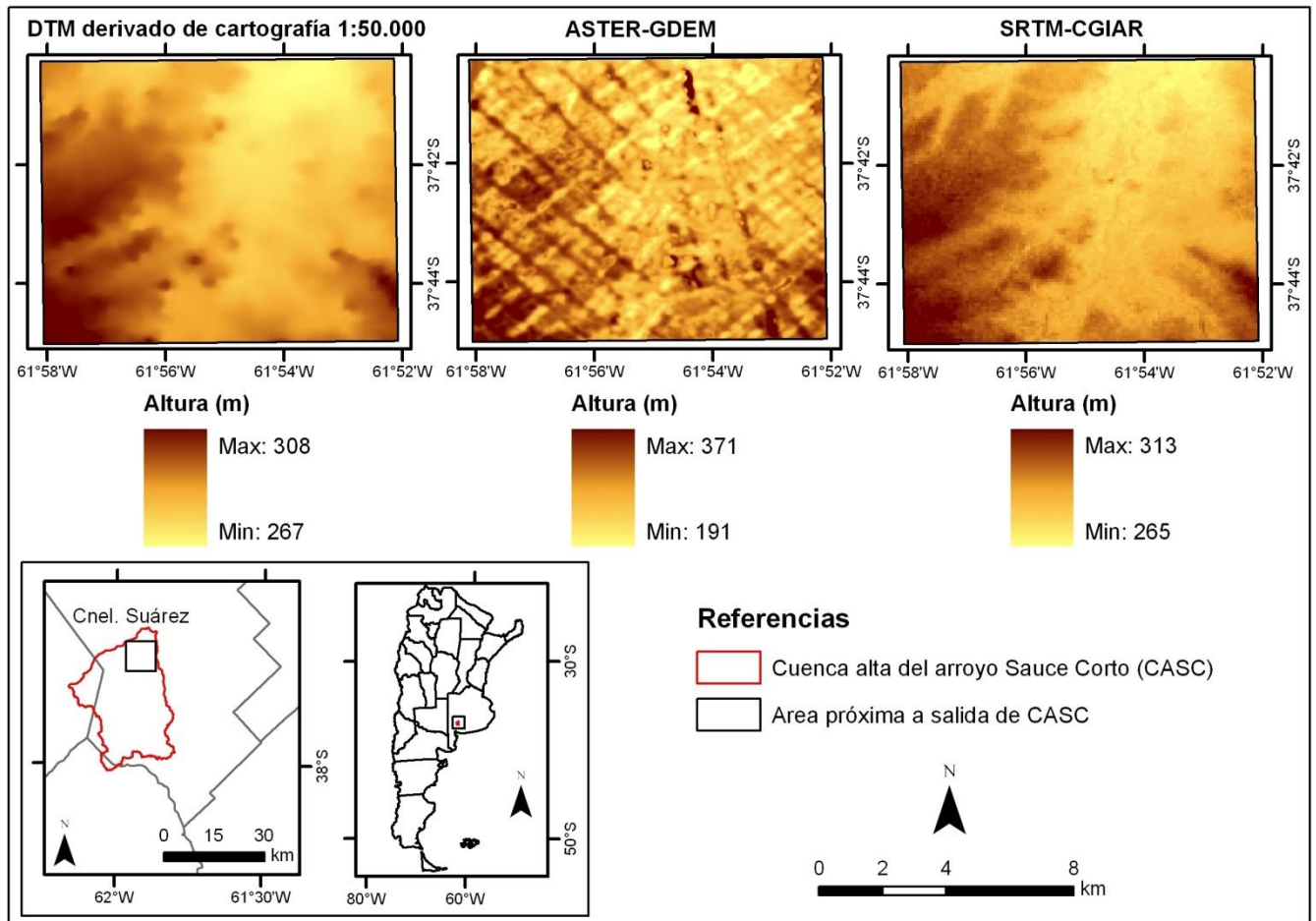


Figura 7. DEM del área de testeo próxima al cierre de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto obtenidos desde diferentes fuentes. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

Para el área cercana a la salida de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto se analizaron 82.114 valores de altura en cada una de las comparaciones. El 95 % de las diferencias altimétricas calculadas se encuentra en el rango $\pm 20,36$ metros para la comparación ASTER-DTM50000 y en el rango $\pm 4,53$ metros para la comparación SRTM-DTM50000 (Tabla 3).

En este sector, la exactitud en términos absolutos también es mayor entre SRTM y DTM50000 y nuevamente ambas confrontaciones tienen un sesgo de distinto signo. Para la comparación con el modelo ASTER el error sistemático ascendió en términos absolutos más de 2 metros (-4,77 metros), mientras que para la comparación con SRTM se registró un aumento de la exactitud en el orden de los decímetros (1,21 metros). El incremento del *BIAS* en la comparación con ASTER, puede asociarse a la presencia de amplios sectores de elevaciones, que está representado en DTM50000, pero que no es posible identificarlos en el DSM ASTER. En referencia a la precisión, el error medio cuadrático para ASTER-DTM50000, descendió a 8,67 metros. Para SRTM-DTM50000, el valor del estadístico desciende a aproximadamente 2 metros, más de 4 metros menos que el valor obtenido para toda la cuenca alta.

	<i>BIAS</i>	<i>Desvío St.</i>	<i>RMSZ</i>	<i>LE95</i>	<i># Puntos</i>
ASTER-GDEM vs DTM50000	-4,77	7,23	8,67	20,36	82.114
SRTM-CGIAR vs DTM50000	1,21	1,56	1,98	4,53	82.114

Tabla 3. Estadísticos (m) para ambas comparaciones (considerando LE95%). (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

En la figura 8 se presenta la distribución espacial y el histograma de frecuencias de las diferencias altimétricas entre los DSM de referencia y DTM50000. Las diferencias altimétricas ASTER-DTM50000 no muestran una distribución espacial que puedan asociarse claramente a factores del terreno o de la superficie. Para la comparación SRTM-DTM50000, las mayores diferencias positivas se concentran en el sector central del área donde estribaciones del sistema serrano no están representadas de forma similar en ambos modelos, así como a lo largo del canal del arroyo Sauce Corto vinculadas a la presencia de vegetación arbórea. Gráficamente en los histogramas de frecuencias y numéricamente en el *BIAS* (Tabla 3) se puede observar que ASTER subestima valores de altura con respecto a DTM50000 mientras que SRTM sobrestima con respecto a DTM50000 pero solo en 1,21 metros. Nuevamente, es el último DSM el que mejor ajusta a las alturas de DTM50000.

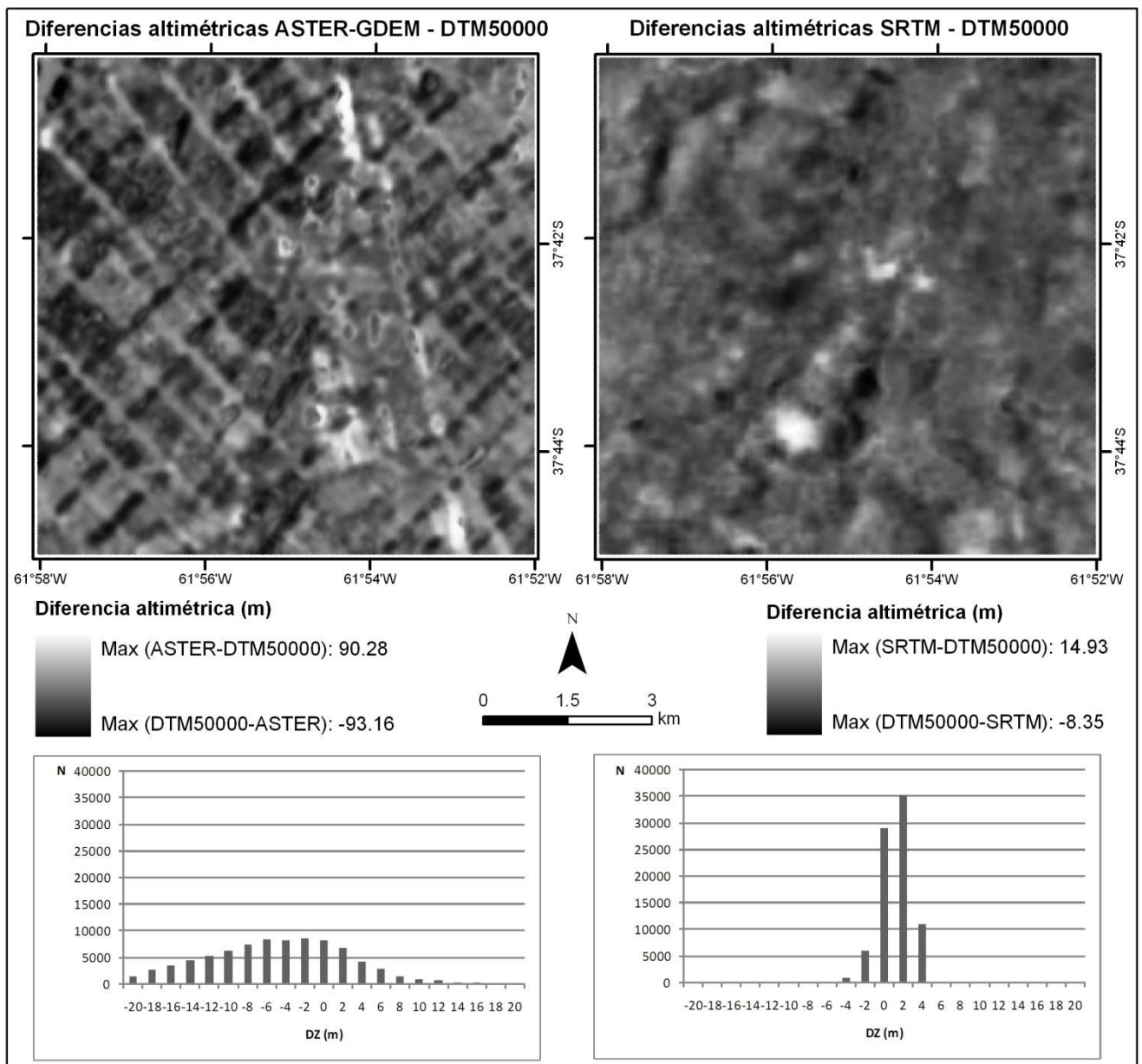


Figura 8. Distribución espacial e histograma de frecuencia de las diferencias de altura entre los DSM de referencia y DTM50000 para el área de testeo próxima al cierre de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (CASC). (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

Colonia Santa María y alrededores

Al igual que en los sectores de testeo previos, las formas del terreno presentan una mejor definición en DTM50000 y SRTM. Entre estos modelos también existe similitud en los extremos que definen el rango altitudinal del área (Fig. 9). En el modelo SRTM se identifica con valores superiores a los del terreno en la parte central del valle del arroyo Sauce Corto la vegetación ribereña que se localiza en las márgenes del canal (Fig. 10) y pequeños conjuntos de vegetación arbórea en sitios puntuales del cauce. ASTER presenta diferencias notables respecto de los restantes DEM en los valores extremos de altura y no posibilita distinguir las principales geoformas de la superficie en el sector que, como se mencionó previamente, pueden atribuirse al “ruido” (Roa Lobo y Camp, 2008) (Fig. 9).

Para el área de testeo denominada Colonia Santa María y alrededores se analizaron 82.114 valores de altura en cada una de las comparaciones. El 95 % de los valores cotejados está en el rango ± 17 metros para la comparación ASTER-DTM50000, y en el rango $\pm 3,43$ metros para la comparación SRTM-DTM50000 (Tabla 4).

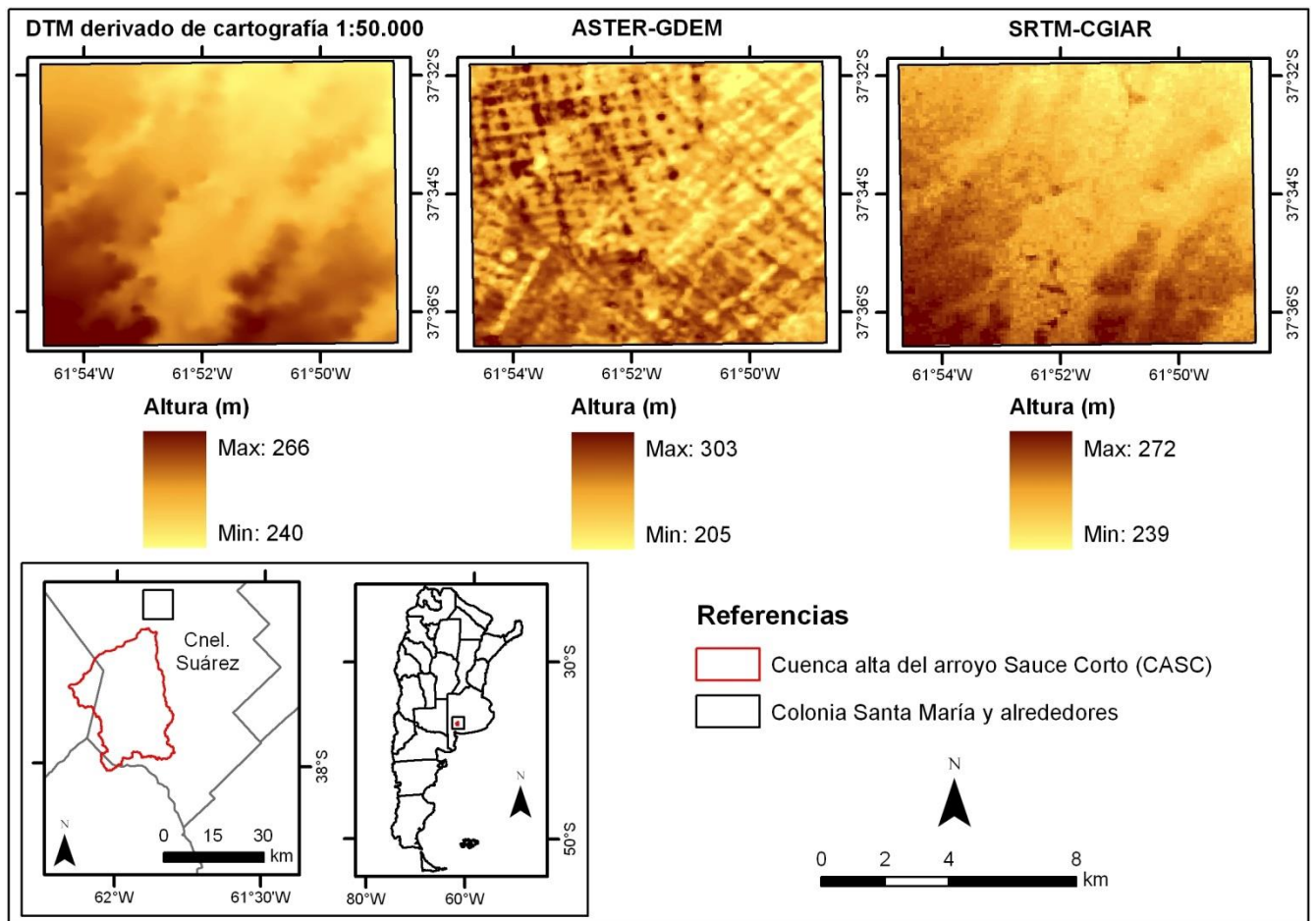


Figura 9. DEM del área de testeo Colonia Santa María. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).



Figura 10. Altura de la vegetación arbórea ribereña en relación con el suelo en un tramo cercano a Colonia Santa María. (Fuente: Gentili, 2011).

Del mismo modo que en los dos sectores previamente analizados, la exactitud en términos absolutos es mayor entre SRTM y DTM50000 y ambas confrontaciones tienen sesgo de signo opuesto. Para la comparación con el modelo ASTER el error sistemático fue de -1,48 metros, mientras que para la comparación con SRTM se registró un leve descenso de la exactitud en el orden de los centímetros (1,28 metros). El *BIAS* mantuvo su signo (en término medio, los valores de altura del modelo ASTER se encuentran por debajo de DTM50000 y los de SRTM por encima).

En relación con la precisión, el RMSZ obtenido fue menor en ambas comparaciones respecto de los sectores precedentes. El error medio cuadrático para ASTER-DTM50000, descendió a 6,96 metros. Para SRTM-DTM50000, el valor del estadístico descendió a 1,61 metros.

	<i>BIAS</i>	Desvío St.	RMSZ	LE95	# Puntos
ASTER-GDEM vs DTM50000	-1,48	6,80	6,96	17	82.114
SRTM-CGIAR vs DTM50000	1,28	0,97	1,61	3,43	82.114

Tabla 4. Estadísticos (m) para ambas comparaciones (considerando LE95%). (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

En la figura 11 se presenta la distribución espacial y el histograma de frecuencias de las diferencias altimétricas entre los DSM y DTM50000 para Colonia Santa María y alrededores. En el caso de SRTM (Fig. 11, derecha) las mayores diferencias absolutas corresponden a sectores en los que el DSM mencionado está por encima de DTM50000. Se observa una cierta continuidad de diferencias de altura notables con orientación suroeste a noreste que corresponde a la vegetación de ribera del arroyo y vinculados al mismo se identifican sectores de formas diversas asociadas a agrupaciones de árboles cuya densidad es lo suficientemente grande para que a la resolución del producto pueda distinguirse.

Nuevamente se observan lineamientos para el caso de ASTER (Fig. 11, izquierda), que pueden atribuirse al “ruido” (Roa Lobo y Camp, 2008). No obstante, en este caso pueden distinguirse elementos antropogénicos tales como caminos rurales, rutas y vías de ferrocarril. A modo de ejemplo, se extrajo del DSM ASTER un perfil transversal a la ruta provincial 85 en su intersección con un camino vecinal en proximidades del acceso a Colonia Santa María (Fig. 12, inferior). El sector de mayor altitud (izquierda) corresponde al terraplén de la ruta provincial 85 mientras que el resto del perfil coincide longitudinalmente con un camino rural que interseca a la mencionada ruta. En el perfil, el rango de variación de alturas es de aproximadamente 40 metros y la diferencia de altura entre el terraplén y el camino rural es siempre superior a 10 metros. Existe una variabilidad notoria de alturas en distancias cortas, que difieren de la realidad según las mediciones realizadas en campo. No obstante ello, claramente el DSM ASTER es sensible a la presencia del terraplén de la ruta (Fig. 12) encontrándose el modelo ASTER sobre DTM50000 (Fig. 11, izquierda). Esta evidencia es de particular importancia, debido a que la ruta está situada transversalmente a la dirección de la pendiente regional impuesta por el sistema de Ventania y a los principales cursos de agua que drenan desde la vertiente norte de las sierras y por tanto es un factor de control de la dinámica hídrica en la cuenca del arroyo Sauce Corto.

Para el camino rural se observa que los valores del modelo ASTER están por debajo de DTM50000. En este caso, independientemente de la diferencia de altura en términos absolutos, en el terreno se puede apreciar la diferencia de altura entre el camino rural y los campos adyacentes que se encuentran sobre elevados respecto de este último (Fig. 11,

izquierda). La situación descrita se observó en numerosos caminos rurales del piedemonte serrano.

En algunos tramos del curso del arroyo Sauce Corto también se observan diferencias positivas que están asociadas a la existencia de masas de vegetación arbórea en sus márgenes. En el sector urbano correspondiente a Colonia Santa María, a la resolución espacial del producto satelital, no es posible asociar las variaciones de altitud con objetos existentes en superficie. Resulta dificultosa la discriminación entre calles, arbolado de alineación y edificación.

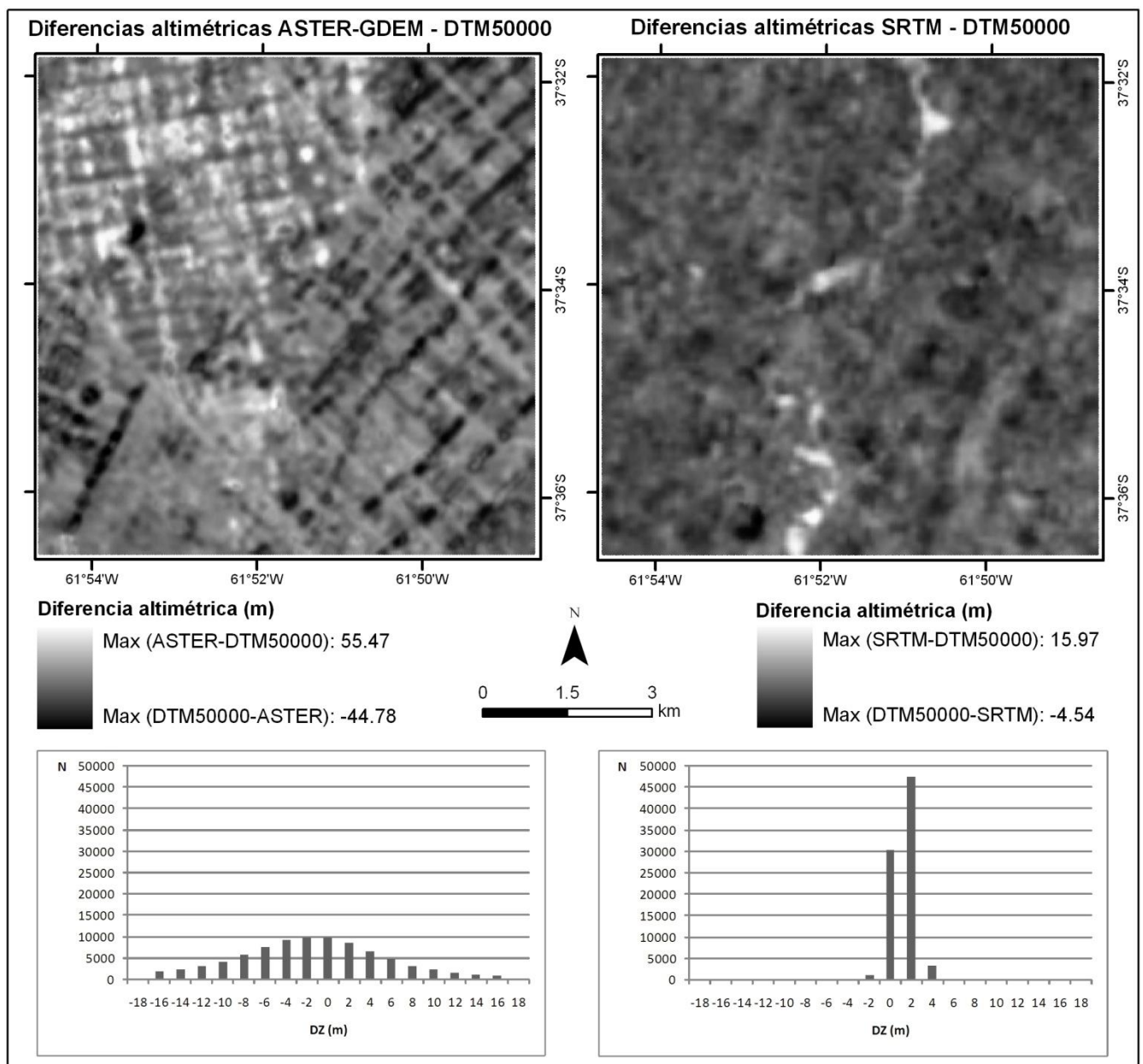


Figura 11. Distribución espacial e histograma de frecuencia de las diferencias de altura entre los DEM de referencia y DTM50000 para el área de testeo Colonia Santa María. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

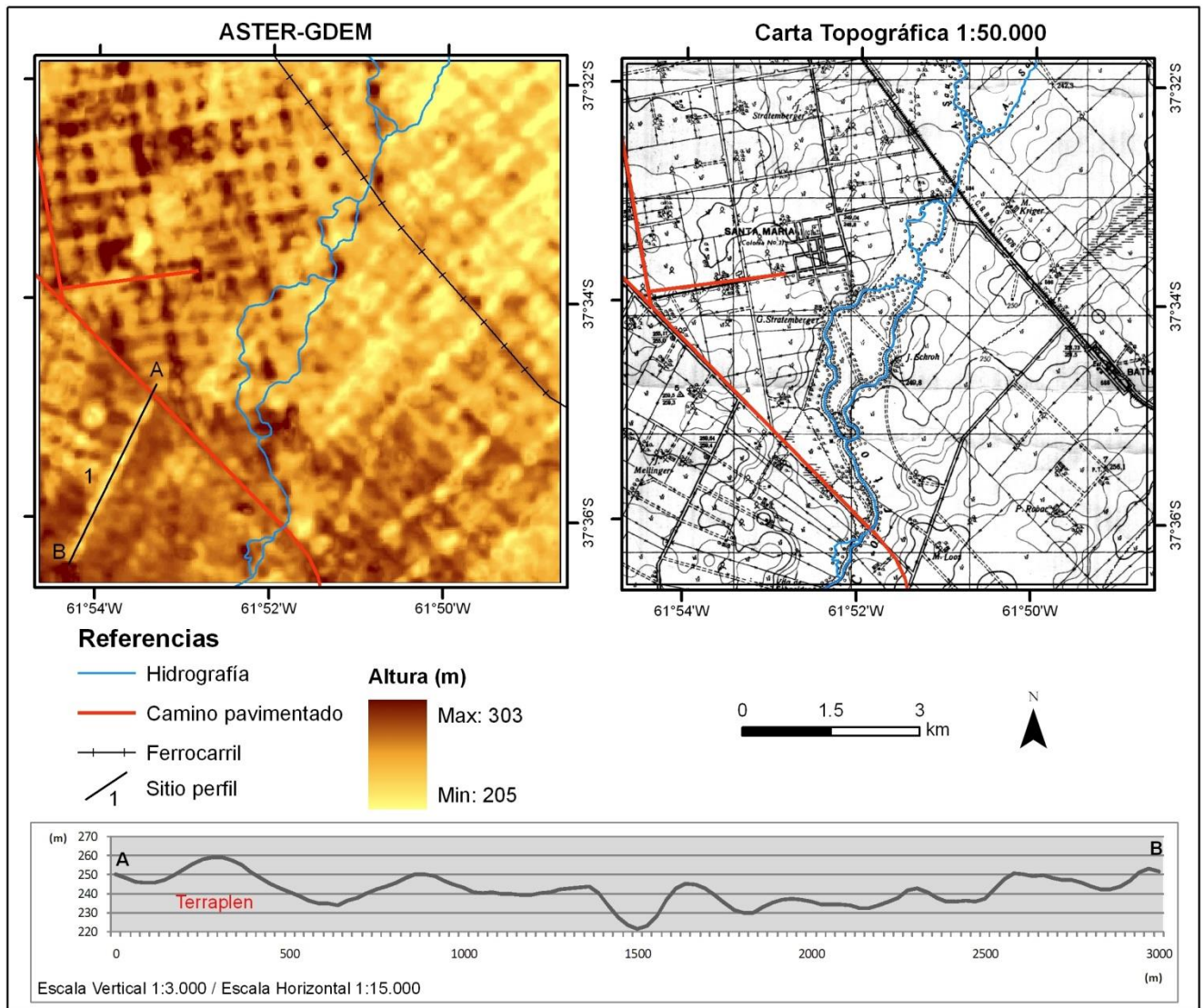


Figura 12. Perfil en una intersección de caminos trazado sobre ASTER. (Fuente: Campo - Gentili - Silva, 2014).

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista cuantitativo, el análisis de los mapas de diferencias altimétricas y de los valores de LE95 % para los tres sectores se mostró que las mayores diferencias de altura en términos absolutos, entre el DTM50000 y los productos satelitales se registraron en la zona serrana. Por el contrario, las zonas de escaso relieve presentaron mayor acuerdo en sus alturas. Tanto en relación con la exactitud como con la precisión, la comparación SRTM-DTM50000 siempre resultó ser la de menores diferencias. En cuanto a las pendientes, los resultados evidenciaron una dependencia de la precisión vertical del DTM50000 respecto de la inclinación del terreno independientemente del DSM considerado como referencia. Por el contrario, no se observó una dependencia del error respecto de la orientación.

En términos cualitativos, DTM50000 y SRTM representan de forma clara las principales geoformas del sector. Se identifica la morfología del terreno a diversos órdenes de magnitud: las sierras en su conjunto, los pedimentos y el amplio valle del arroyo Sauce Corto. Por el contrario, el DSM ASTER no refleja la morfología del terreno para las geoformas de menor orden de magnitud existentes en el área.

Como se mencionó, el producto SRTM presentó mayor similitud altimétrica y morfológica respecto al DTM50000 en los tres casos analizados. Este DSM a 90 metros de resolución presenta una equivalencia con el DTM generado de cartografía a escala 1:50.000, mayor aún cuanto más plana es la zona. Es por ello que para el área evaluada y de acuerdo a sus características, ante la ausencia de curvas de nivel y puntos de altura que posibiliten la generación de un DTM, el producto mencionado constituye una alternativa abordable para la modelación ambiental. No obstante ello, en áreas donde la vegetación o los elementos antropogénicos tengan una influencia notable en relación con los fines de la aplicación, el uso de SRTM debe ser analizado.

La resolución de SRTM y la escala del DTM50000 acotan su uso a los estudios a escalas regionales donde la microtopografía no sea considerada. El uso del modelo ASTER en el área de estudio para un abordaje a escala de análisis mayor (asociado a la mayor resolución espacial del producto) no supone una mejora sustancial ya que no es posible la identificación de geformas menores y resulta dificultosa la discriminación entre calles, arbolado de alineación y edificación en el sector urbano.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó en el marco del proyecto de investigación “*Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas a diversas escalas temporo-espaciales*” dirigido por la Dra. Alicia M. Campo y subsidiado por la SGCyT-UNS (24/G067).

Los autores agradecen al Dott. M. Crespi por facilitar el software DEMANAL (*version for Università di Roma La Sapienza from Leibniz University Hannover, Alemania*) desarrollado por el Dr. K. Jacobsen. El software para el procesamiento de los DEM fue utilizado durante una Estancia de Investigación Doctoral desarrollada en el Área de Geodesia y Geomática, Università di Roma “La Sapienza” en el marco de un proyecto vencedor de una beca correspondiente a EUROTANGO Project (ERASMUS MUNDUS ACTION 2-STRAND 1 Programme), financiada por la Comisión Europea (UE).

BIBLIOGRAFÍA

Casado, A., Gentili, J. Campo, A. y Peiry, J. 2010. Evaluación de la calidad de modelos digitales de elevación derivados de curvas de nivel para aplicaciones hidrológicas. En: Angeles, G., Carbone, E y Melo, W. (comp.). **Tecnologías de la Información Geográfica del sur argentino**. UNS. Bahía Blanca. Capítulo n° 10, pp. 102-116.

Cook, A. y Merwade, V. 2009. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, 377, pp. 131-142.

Diez Herrero, A. 1999. Utilización de los SIGs en el análisis del riesgo de inundación en el alto Alberche (Cuenca del Tajo). En: Luis Laín Huerta (comp.) **Los Sistemas de Información Geográfica en los Riesgos Naturales y el Medio Ambiente**. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. pp. 49-68.

Diez Herrero, A.; Lain Huerta, L. y Llorente Isidro, M. 2006. **Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación**. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

El-Sheimy, N., Valeo, C. y Habib, A. 2005. **Digital Terrain Model. Acquisition, manipulation and applications**. ARTECH HOUSE. Boston.

Felicísimo, A. 1994. **Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales**. Pentalfa. Oviedo.

Gentili, J. O. 2012. **Hidrografía del arroyo Sauce Corto aplicada al estudio de inundaciones y anegamientos**. Tesis de Doctorado en Geografía. Bahía Blanca, Argentina. Universidad Nacional de Sur, Departamento de Geografía y Turismo, 146 pp.

González Uriarte, M., Carballo O., Aldacour, H y Calmels, A. 1988. Geomorfología de la Sierra de Bravard y su piedemonte. En: **Actas de Segundas Jornadas de Geología Bonaerense**. UNS. Bahía Blanca, pp. 173 - 185.

Gorokhovich, Y. y Voustianiouk, A. 2006. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. **Remote Sensing of Environment**, 104(4), pp. 409-415.

Grimaldi, S., Petroselli, A., Alonso, G., Santini, M. y Nardi, F. 2009. **Flow time estimation in ungauged basins**. 8th IAHS Scientific Assembly & 37th IAH Congress.

Hall, M. y Tragheim, D. G. 2010. The accuracy of ASTER digital elevation models: a comparison with NEXTMap Britain. En: **Elevations Models for Geoscience**. Geological Society, Special Publication 345. pp. 43-53.

Harrington, H., 1947. **Explicación de las hojas geológicas 33 m y 34 m Sierra de Curamalal y de la Ventana, Pcia. de Bs. As.** Ministerio de Industria y Minería. Buenos Aires.

Harrington, H., 1980. Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. En: **Actas Segundo Simposio de Geología Regional Argentina**. Córdoba. pp 967 – 983.

Jacobsen, K. 2006. ISPRS-ISRO. **Cartosat-1 Scientific Assessment Programme (C-SAP) Technical report - test areas**. Mausanne and Warsaw, ISPRS. Com IV, Goa 2006, IAPRS Vol. 36 Part 4, pp. 1052-1056.

Jarvis, A., Rubiano, J., Nelson, A., Farrow, A. y Mulligan, Mark. 2004. **Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data**. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia, N° 198.

Kellndorfer, J., Walker, W., Pierce, L., Dobson, C., Fites, J. A., Hunsaker, C., Vona, J., y Cluter, M. 2004. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, pp. 339 - 358.

Lastra, J., Fernández, E., Díez Herrero, A. y Marquínez, J. 2008. Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. **Natural Hazards**, 45, pp. 277-293.

Maestro Cano, I. C., Pardo Pascual, J. E. y Porres De La Haza, M. J. 2003. **Mejoras en la extracción automática de redes de drenaje aplicando el modelo área-pendiente**. IX Conferencia Iberoamericana de SIG, Cáceres, España.

Matsunaga, K., Nakaya, T. y Sugai, T. 2009. Simple DEM-Based Methods to Delineate Channel Networks for Hydrogeomorphological Mapping. **Transactions in GIS**, 13, pp. 87-103.

Merwade, V., Cook, A. y Coonrod, J. 2008. GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. **Environmental Modelling & Software**, 23, pp. 1300-1311.

Ozdemir, H. y Bird, D. 2009. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. **Environmental Geology**, 56(7), pp1405-1415.

Pereyra, F. y Ferrer, J. 1995. Geomorfología del flanco nororiental de las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. En: **Actas IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses. Junín**. pp. 239 – 247.

Petroselli, A., Santini, M., Nardi, F., Grimaldi, S. y Vivoni, E. 2007. **Investigating the spatial variability of hillslope flow velocities**. AGU, Fall Conference 2007. Session H43 Remotely-Sensed DTMs for Hydrogeomorphic Applications.

Roa Lobo, J. y Kamp, U. 2008. Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida. Venezuela. **Revista Geográfica Venezolana**, Vol. 49 (1), pp. 11-42.

Rulli, M. C., Nardi, F., Santini, M., Petroselli, A. y Grimaldi, S. 2007. **Flow routing algorithms and landslide modelling**. AGU, Fall Conference 2007. Session H43 Remotely-Sensed DTMs for Hydrogeomorphic Applications.

Sanders, B. F. 2007. Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. **Advances in Water Resources**, 30, pp. 1831-1843.

Tricart, J. L. 1973. **Geomorfología de la Pampa Deprimida como base para los estudios edafológicos y agronómicos**. INTA. Buenos Aires.

Wu, S., Li, J. y Huang, G. H. 2008. A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. **Applied Geography**, 28, pp. 210-223.

© Alicia María Campo, Jorge Gentili y Andrea Silva

Campo, A.M.; Gentili, J.; Silva, A. 2016. Comparación de DEM generados a partir de diferentes fuentes de datos. Cuenca del arroyo Sauce Corto, Sistema de Ventania, Argentina. **Geografía y Sistemas de Información Geográfica**. 8(8)Sección II:34-55
On-line: www.gesig-proeg.com.ar

Recibido: 16 de febrero de 2015 / Aprobado: 27 de marzo de 2015