

# MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES PARA LA SUBREGIÓN A1 DEL PLAN MAESTRO DEL RIO SALADO Y PARA LA CIUDAD DE JUNIN

## DIGITAL ELEVATION MODEL FOR THE A1 SUB-REGION OF THE SALADO RIVER MASTER PLAN AND FOR THE CITY OF JUNIN

María Eugenia Gomez<sup>1,2</sup>, Raul Perdomo<sup>1,2</sup>, Lautaro Simontacchi<sup>1</sup>, Santiago Perdomo<sup>1,2</sup>, María Florencia Tavarone<sup>1</sup>, Daniel Del Cogliano<sup>1,2</sup>, Martín Vazquez<sup>1</sup>, Nicolás Tessone<sup>1</sup>

1 Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata. Paseo del Bosque S/N, La Plata - Argentina.

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Godoy Cruz 2290, CABA - Argentina  
Email: megomez@fcaglp.unlp.edu.ar

### RESUMEN

El presente trabajo presenta un modelo digital de elevaciones (MDE) para la subcuenca A1, perteneciente a la cuenca del Río Salado y otro MDE para la ciudad de Junín. Es decir, el trabajo se dividió en dos regiones; una macro (nivel de cuenca) y una mucho más pequeña (ciudad de Junín). La elaboración de los MDE para cada región implicó analizar modelos de terreno globales derivados de la misión SRTM y del sensor ASTER, analizar su error en vertical y validar la información. Esto fue realizado a partir de puntos de control (GCP, por sus siglas en inglés) representados por puntos de GPS/nivelación para el caso del MDE de la cuenca, o con ménsulas ubicadas en la ciudad de Junín para el caso del MDE correspondiente al caso urbano de esta ciudad. También fue necesario incorporar herramientas como modelos geopotenciales globales y el modelo de transformación de alturas tdaGEOBA.

Los principales resultados alcanzados pueden resumirse del modo siguiente: 1-el modelo SRTM3 resultó ser el más apropiado para modelar la topografía a nivel de la subcuenca A1; 2-el modelo de geoide global EGM08 corregido por una constante constituye un herramienta muy precisa para extrapolar el modelo tdaGEOBA al sur de Santa Fe; este último resultó adecuado para corregir a los MDE (una vez desafectados del modelo de geoide EGM96) en la toda la región de estudio; 3- en las zonas llanas de esta región el modelo SRTM3 corregido presenta errores con una desviación estándar muy cercana al metro; 4- la ciudad de Junín cuenta con un sistema de ménsulas que permitieron construir un MDE urbano con una precisión decimétrica.

**Palabras clave:** Cuenca del Río Salado, Plan Maestro del Río Salado, modelo digital de elevaciones, geoide, tdaGEOBA

### ABSTRACT

The present work presents a digital elevation model (DEM) for sub-basin A1 that is included in the Salado River basin and another DEM for the city of Junín. Thus, the work was divided into two regions; a macro (basin level) and a much smaller one (city of Junín). The building of DEMs for each area involved the analysis of global terrain models derived from SRTM mission and ASTER sensor, the study of their vertical error and the validation of the information. This was done through ground control points (GCP), represented by GPS/leveling points for the sub-basin DEM case and with altimetric points for the city of Junín. It was also necessary to use tools such as global geopotential models and the tdaGEOBA height transformation model.

The main results achieved can be summarized as follows: 1-the SRTM3 model was the most suitable to model the topography at sub-basin level A1; 2-the global geoid model EGM08 corrected by

a constant value is a very accurate tool to extrapolate tdaGEOBA to the south of Santa Fe province; the latter was suitable to correct the SRTM3 model (once disaffected from the EGM96 geoid model) in the entire study region; 3 - in flat areas the corrected SRTM3 model showed errors with a submetric standard deviation; 4- the city of Junín has a network of altimetric points that allowed to obtain an urban DEM with a decimetric precision, which is consistent with the corrected SRTM3 in countryside places.

**Keywords:** Salado River Basin, Master Plan of Salado Basin, digital elevation model, geoid, tdaGEOBA

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca en un proyecto FONARSEC (Fondo Argentino Sectorial), financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) cuyo objetivo es el establecimiento de un sistema de alerta y soporte de decisiones ante un eventual riesgo hídrico en la cuenca alta del Río Salado (subregión A1 del Plan Maestro Integral Cuenca del Río Salado, PMRS, MOSP 1999). Este es un plan de manejo integral de la cuenca, definida ésta según límites políticos, de manera tal que se considera a los límites de la provincia de Buenos Aires como borde externo de la cuenca. Las subregiones hídricas en que se divide, también están delimitadas políticamente (Fig.1).



**Figura 1** Croquis de las subregiones del PMRS. En azul se señala la subregión A1 y con un punto rojo, la ciudad de Junín ubicada en el límite de la misma (Adaptado de MOSP, 1999).

**Figure 2** Sketch of PMRS subregions. A1 subregion is depicted in blue while the city of Junín is marked with a red point in the border of the subregion. (Adapted from MOSP, 1999).

El primer problema planteado en este trabajo fue el de la región de estudio ya que el propósito era trabajar a nivel de cuencas o subcuencas, definidas por su sistema de drenajes y no de subregiones determinadas políticamente. Por ello se consideró como región de estudio la subcuenca definida según el trabajo de Gómez et al. (2017), la que contempla una redefinición de los límites de la cuenca del río Salado y sus subcuencas. La subregión A1 según el PMRS tiene una superficie de 12.427,81 km<sup>2</sup>, distribuida sólo en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, mientras que el área de estudio utilizada en este trabajo tiene una superficie de 17.742,85 km<sup>2</sup> e incluye el sur de la provincia de Santa Fe.

De acuerdo con el proyecto, una de las primeras actividades consistió en la elaboración y validación de un modelo digital de elevaciones (MDE) para toda la región.

Un MDE es una representación en 3D de la superficie de la Tierra libre de vegetación y edificios, donde la unidad básica es un valor de altura  $z$ , al que acompañan correspondientes valores de  $x$  e  $y$ , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa georeferenciación (Felicísimo, 1994). Para este trabajo,  $x$  e  $y$  representan la latitud y longitud, respectivamente.

Este tipo de productos se utilizan para múltiples aplicaciones en el contexto de estudios asociados al cambio climático y riesgo hídrico (Moore et al., 1991; Gamett, 2010), entre otras. Participan en la determinación de usos de suelo, modelos hidrológicos, obras hidráulicas, a partir de los cuales se pueden generar modelos de inundación y sus alcances (Hirabayashi et al., 2013). En particular son útiles para la determinación morfométrica de cuencas como se presenta en los trabajos de Gaspari et al. (2012) y Castillo et al. (2015).

Un MDE puede obtenerse de distintas maneras, ya sea a partir de métodos directos o indirectos. Dentro de los directos se encuentran los obtenidos con altimetría radar, LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), GPS (Global Positioning System), nivelación, o estación total. Entre los indirectos encontramos a la digitalización de curvas de nivel y a la fotogrametría. En este último caso, los MDE se obtienen por restitución (Felicísimo, 1994).

En zonas pobladas, no muy extensas, a veces es posible contar con MDEs derivados de relevamientos LIDAR o fotogrametría (Krabill et al., 1984; Beumier y Idrissa, 2016). Pero en regiones de gran extensión como la cuenca del Río Salado o parte de ella, MDEs del tipo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) o ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) pueden resultar apropiados para caracterizar la topografía. Sin embargo, este tipo de modelos contiene errores que se relacionan con la metodología propia de extracción de la elevación, con el procesamiento de la información colectada y con la influencia de la vegetación y otras estructuras como edificios. Estos errores deben ser analizados y mitigados, previo la utilización de un MDE ya que afectan a todas las componentes de la posición, tanto en vertical como en horizontal y en general ambas están correlacionadas (Fan 2016, Felicísimo 1994).

Para efectuar el control horizontal de un MDE es necesario contar con puntos de control de terreno (GCP, por sus siglas en inglés) con coordenadas conocidas y de calidad superior a las del MDE que representen estructuras identificables en el terreno (intersección de calles, de sembrados, etc). Este no es el caso que se presenta en este trabajo ya que no disponemos de puntos de esas características a lo largo y ancho de la subcuenca A1. Por otra parte, cuando se trata de determinar la morfometría de una cuenca, las variables son ponderadas espacialmente. En una cuenca con miles de hectáreas, cada dato tiene una importancia o peso relativo en relación a los demás datos. Por ello, un píxel de 30 a 90 m con una georeferenciación de error métrico en horizontal, como la que presentan los modelos mencionados, es suficiente para un estudio hidrológico. Estudios como el de Castillo et al. (2015) y Oñate Valdivieso et al. (2007) muestran que aun en zonas donde la elevación es muy variable, un modelo de mayor precisión horizontal que el SRTM3 (90 m de resolución) puede no mejorar la estimación de los parámetros morfométricos de una cuenca. Por esta razón, aún cuando no se ignora la posible correlación entre errores horizontales y verticales, en este trabajo pondremos el foco en el error relacionado con la componente vertical.

La precisión vertical requerida en este estudio es decimétrica-centimétrica de manera tal que represente correctamente la morfología de la subcuenca A1 y que no sólo brinde alturas físicas a partir de algún modelo de geoide, sino que además éstas estén referidas a la referencia vertical Argentina. Cabe recordar que el origen vertical de las alturas provistas por modelos derivados de las misiones SRTM o ASTER es el geoide del modelo geopotencial global EGM96 (Lemoine et al., 1996).

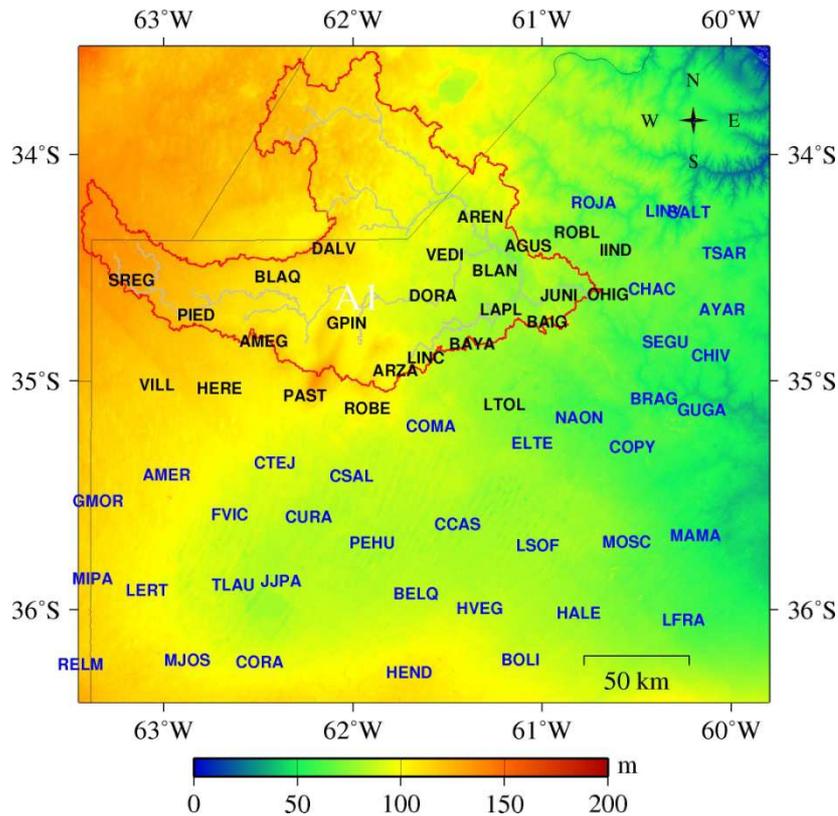
En nuestro país, trabajos de comparación entre modelos derivados de ASTER y SRTM muestran que estos tienen una calidad métrica cuando son comparados con alturas observadas con GNSS (Global Navigation Satellite System, Díaz et al., 2010) o cuando se los evalúa por medio de puntos altimétricos (Burgos, 2009; IGN, 2016).

El objetivo de este trabajo es la evaluación y consiguiente mejoramiento vertical de un MDE para la subcuenca A1 y otro para el casco urbano de la ciudad de Junín, incluida dentro de los límites de la subcuenca. Si bien la zona de estudio abarca toda la subcuenca A1 del Río Salado, el modelo de riesgo hídrico tendrá a la ciudad de Junín como zona de prueba. Es por esto que dividiremos el trabajo en dos escalas: a nivel de subcuenca (macro) y a nivel de la ciudad de Junín. En el primer caso nos centraremos en los MDE globales, mientras que en el segundo trabajaremos con un MDE generado a partir de información local.

## REGION DE ESTUDIO Y BASE DE DATOS

### La subcuenca A1

La Figura 2 muestra en rojo, la subcuenca A1 y sobre la misma también se ha volcado el modelo de elevaciones SRTM3 (Farr et al., 2007) y el sistema de drenajes de la región (Gaspari, com. pers.). Este último muestra que para un correcto modelado de los aportes hídricos resulta necesario extender la zona más allá de los límites que marca el PMRS. En el presente trabajo utilizaremos como área de investigación, la región marcada en rojo obtenida a partir del trabajo publicado por Gomez et al., (2017). Esta tiene una superficie de 17.742,85 km<sup>2</sup>, incluye el sur de la provincia de Santa Fe y fue obtenida mediante el análisis de la topografía en conjunto con el sistema de drenajes.



**Figura 3** Topografía según SRTM3 en la región de estudio, incluido el sur de la provincia de Santa Fe. Sobre el mapa se ha volcado el sistema de drenajes de la zona en cuestión (celeste) y la denominada subcuenca A1 (rojo). Con letras negras se indican los puntos de GPS/Nivelación que se ubican sobre la subcuenca A1 y en azul aquellos aledaños, en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. La ciudad de Junín está representada por el punto JUNI ubicado a 7 km de la misma.

**Figure 4** SRTM3 topography in the study region, including the south of Santa Fe province. The drainage system of the area (light blue) and the A1 sub-basin (red) have been overlapped. GPS/levelling points located on the A1 basin have been depicted in black and those points close to the sub-basin in the northwest of Buenos Aires province, have been marked in blue. The city of Junín is represented by the point called JUNI, located 7 km away from the city.

## DATOS

### Modelos del tipo SRTM

Se hace referencia a los modelos derivados de la misión SRTM. Esta fue un proyecto conjunto entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), la *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA) y las agencias espaciales alemana e italiana, DLR y ASI, respectivamente (Farr et al., 2007). Su objetivo era obtener un modelo de topografía con cobertura casi global por medio de

interferometría por radar de apertura sintética (InSar por su acrónimo en inglés). A bordo del transbordador *Endeavor* que sobrevoló la Tierra durante 11 días (11 al 22 de febrero de 2000), se montaron dos instrumentos InSAR (Radar Interferométrico de Apertura Sintética) separados por aproximadamente 60 m (Burgos, 2009): uno para la banda X (3 cm) y otro para la banda C (6 cm). Estos colectaron datos entre las latitudes  $-56^{\circ}$  y  $60^{\circ}$  (Farr et al., 2007).

Como parte de la misión, se realizó una campaña global de datos observados con GPS en modo KGPS (GPS cinemático) que servían como puntos de control en el terreno. En total se colectaron un total de 9,4 millones de muestras, distribuidas sobre los seis continentes cuya posición tenía una exactitud media aproximada de 0.5m (Rodríguez et al., 2005).

El máximo error absoluto estimado en altura es 16 m aproximadamente y 20 m en horizontal, según Rodríguez et al. (2006).

De la misión se derivaron varios modelos con distintas calidades y resoluciones. Entre los que analizaremos en este trabajo se encuentran SRTM3 (versión 4.1) y MDE-Ar (Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina), de 90 y 45 m respectivamente. MDE-Ar fue publicado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) en 2014. Es un producto derivado del modelo SRTM1 (de 30 m de resolución) provisto por la NGA al IGN de Argentina, quien mediante técnicas de filtrado, relleno e inclusión de datos en zonas de lagos, generó un modelo con una resolución de 45 m con una exactitud vertical de 3,23 m estimada a partir de la evaluación sobre aproximadamente 9000 puntos altimétricos distribuidos en nuestro país (IGN, 2014).

El SRTM3 fue obtenido del sitio del CGIAR (Consultative Group for International Agricultural Research), mientras MDE-Ar fue descargado desde la página web del IGN.

## **ASTER**

Se hace referencia a los modelos derivados del sensor ASTER. Este es un sensor que fue lanzado al espacio a bordo del satélite Terra en 1999. Este trabaja en tres bandas en el visible e infrarrojo cercano, seis bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta y cinco bandas en el infrarrojo térmico que le permiten alcanzar diferentes resoluciones. En 2009 y 2011, la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI, por sus siglas en inglés) publicaron los modelos digitales de elevación global GDEM1 y GDEM2 respectivamente.

La metodología utilizada para la generación del modelo topográfico consistió en la adquisición de pares de imágenes estereoscópicas. La primera versión fue producto de una compilación de 1,2 millones de imágenes estéreo y la segunda (versión utilizada en este trabajo) incorporó 260.000 imágenes más. Tiene una cobertura global de  $-83^{\circ}$  a  $83^{\circ}$ . En este trabajo utilizaremos GDEM2 que, de acuerdo con NASA (2011), tiene una exactitud en altura mejor que 20 m en absoluto y se estima que, en horizontal, la precisión absoluta es de 7 m. En este trabajo hemos utilizado la versión 2, de 30 m de resolución, disponible en: <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>.

Los errores mencionados para todos los modelos deben controlarse localmente ya que en muchos casos representan errores promedio obtenidos con puntos GNSS pobremente distribuidos (sobre todo en Sudamérica y otras regiones) y en algunos casos con puntos GNSS cuyas coordenadas tienen calidades decimétricas (Rodríguez et al, 2005).

Tanto las observaciones de las misiones ASTER o SRTM, como las mediciones GNSS requieren de la utilización de modelos geopotenciales globales o de un modelo de geoide local (según el caso) para transformar sus alturas elipsoidales en ortométricas. El estudio del comportamiento de estos modelos es fundamental si se quiere obtener una referencia altimétrica común.

## **Modelos geopotenciales globales**

EGM96 (Lemoine et al., 1997) y EGM08 (Pavlis et al., 2012) son dos modelos geopotenciales globales elaborados por la NGA (National Geospatial Intelligence Agency) de Estados Unidos. Ambos fueron pioneros en su momento. El EGM96 fue el primer modelo en alcanzar un desarrollo en armónicos esféricos del campo gravitacional de grado y orden 360, mientras el EGM08 fue el primer en alcanzar grado y orden 2159, lo que implicaba resoluciones de 50 y 9 km, respectivamente.

EGM08 superó ampliamente en resolución y calidad al EGM96 y a muchos modelos de su época (Pavlis et al., 2012).

Evaluaciones llevadas a cabo en la región de estudio, sobre 65 puntos de GPS/nivelación, indican un desvío estándar de 0,18 m en vertical para el EGM96, en tanto el modelo EGM08 presenta un desvío estándar que no supera los 0,05 m. Por esta razón, en las siguientes secciones se utilizará el

modelo EGM08 cuando no hubiere información observacional de ondulaciones geoidales, previo análisis de la información de la región.

Estos valores concuerdan con las precisiones estimadas para cada uno de los modelos que va de 0,05 m a 0,10 m para el EGM08 (Pavlis et al., 2012) y de 0,5 m a 1 m para el EGM96 (Kenyon et al., 2007).

### **El modelo de Transformación de Alturas tdaGEOBA**

Es un modelo que permite transformar alturas elipsoidales referidas a POSGAR07 en cotas sobre el nivel medio del mar (s.n.m.m). Fue realizado en base a la información de GPS /nivelación de 400 puntos distribuidos sobre la provincia de Buenos Aires los que permitieron obtener una grilla de ondulaciones geoidales para toda la provincia.

Para realizar la transformación se vale de la ecuación de Heiskanen y Moritz (1967)

$$H = h - N \quad \text{ec. (1)}$$

Donde  $H$  es la cota que queremos determinar,  $h$  es la altura elipsoidal obtenida con GPS y  $N$  es la ondulación geoidal que provee el modelo. Si bien en el presente caso,  $H$  no es una altura ortométrica, se asume que se aproxima en el orden de 1 cm, en provincia de Buenos Aires (Valenti, 2012).

El error estimado para la determinación de cotas o alturas con este modelo es de 0,03 m (Perdomo et al., 2012).

### **Puntos de control**

Sobre la Figura 2 se muestran los GCP utilizados a priori para el análisis. Conforman un total de 65 puntos de GPS/nivelación, es decir cuentan tanto con coordenadas geodésicas como con cota. De éstos, aproximadamente 25 (señalados en negro) se ubican sobre la subcuenca A1, y el resto aporta información de todo el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Las coordenadas geodésicas tienen una exactitud de 2 cm en horizontal y 3 cm en altura (Perdomo et al, 2012, Gómez 2006), mientras la cota derivada de la nivelación tiene una exactitud aun mejor que el centímetro en regiones como la de estudio. De esta manera, los GCP tienen una calidad superior a la de los MDE que se pondrán a consideración para su utilización en la subcuenca A1.

### **Ménsulas localizadas en la ciudad de Junín**

Como se comentó en la introducción, el proyecto en el que se enmarca esta investigación requiere un detalle mayor para la zona urbana de la ciudad de Junín.

Los MDE listados anteriormente no están por completo libres de vegetación ni edificaciones lo que ocasiona que la altura del pixel es muchas veces el promedio de las alturas de construcciones o vegetación circundantes. Por ello, para la ciudad de Junín se optó por la generación de un MDE a partir de la información altimétrica de ménsulas distribuidas por la ciudad (ver Fig. 3). Su ubicación y cotas fueron provistas por la Secretaría de Obras Públicas del Municipio de Junín. Las mismas pertenecen a la dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires (GE) y a Obras Sanitarias de la Nación (OS).

Las ménsulas se ubican sobre paredes por lo que el paso del tiempo y las modificaciones edilicias son responsables de su desaparición en muchos casos. Por otra parte se desconoce su altura al piso. Este último dato es importante ya que las ménsulas contienen información de cota que, si lo que se quiere obtener es un MDE, debe ser reducida a nivel del suelo.

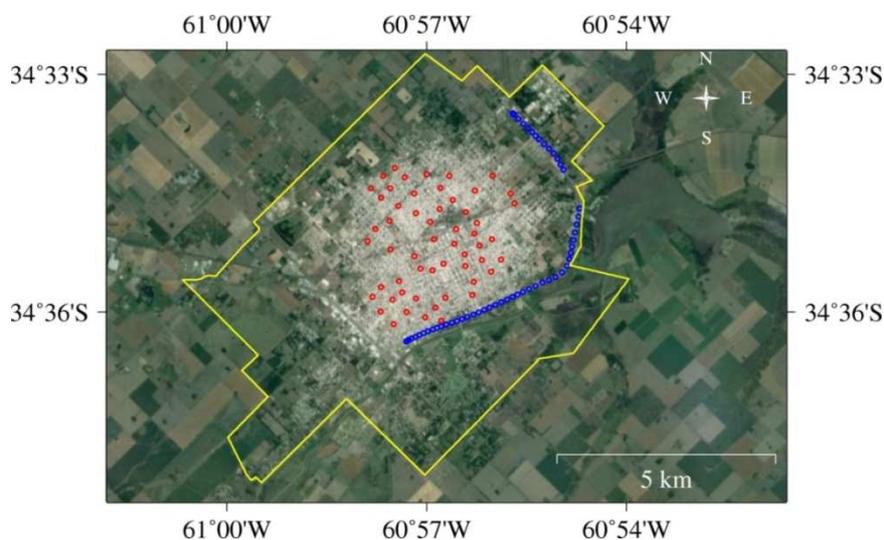
Para esto se realizaron cinco campañas de reconocimiento y medición de la altura entre el piso y las ménsulas. Se reconocieron un total de 55 ménsulas en buen estado de conservación, lo que implica que tampoco han sido desplazadas de su posición original. Sólo las veredas han sufrido cambios, razón por cual la medición de la altura al suelo fue imprescindible.

### **Puntos GPS cinemático**

Con el fin de aportar información de borde de la ciudad de Junín, se realizó un relevamiento GPS cinemático en la zona de circunvalación (Fig. 3). Fue vinculado a POSGAR07 por medio del punto JUNI perteneciente a esta red y localizado a unos 8 km al sudeste de la ciudad.

En este y todos los casos mencionados en este trabajo se utilizaron 2 receptores geodésicos TRIMBLE 4700 y R5, de doble frecuencia. Las coordenadas geodésicas han sido vinculadas a POSGAR07, lo que explica junto con el método de observación, la calidad de las posiciones estimada en 5 cm.

Estos puntos al igual que las ménsulas ubicadas en la ciudad de Junín, servirán tanto para la determinación del MDE urbano como para su validación haciendo uso de la metodología que se describirá más adelante.



**Figura 3** Distribución espacial de las ménsulas en la ciudad de Junín (rojo). En amarillo, los límites de la ciudad de Junín junto con el trayecto GPS cinemático (azul) volcados sobre imagen Landsat (Datos del mapa: Google Imagery @2018, DigitalGlobe).

**Figure 3** Spatial distribution of altimetric information in the city of Junín (red). The boundaries of the city are depicted in yellow together with the GPS kinematic trajectory (blue) on a Landsat image. (Map data: Google Imagery @2018, DigitalGlobe).

## METODOLOGÍA y ANÁLISIS

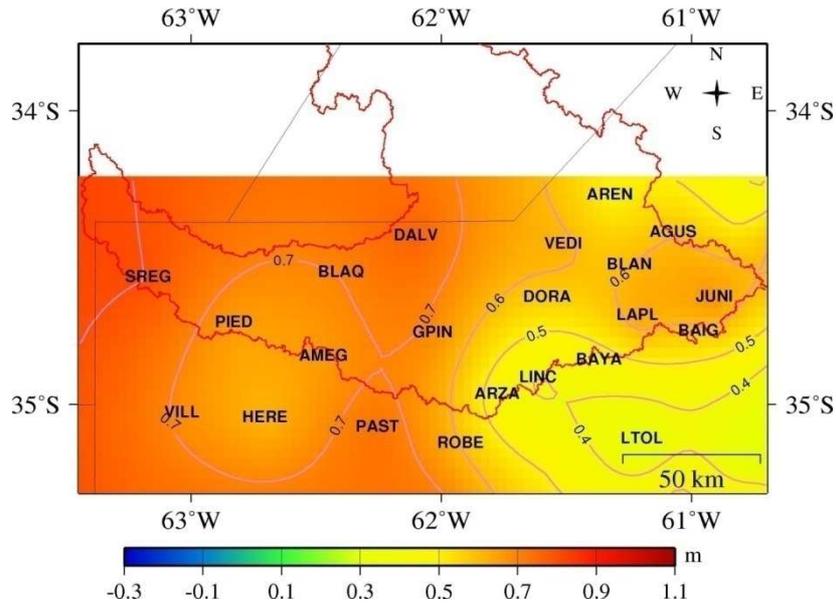
### La referencia vertical de los MDE seleccionados

Tanto los modelos ASTER como SRTM, son originalmente geométricos y refieren sus observaciones en altura al geode del EGM96 (Lemoine et al., 1998) para que las alturas puedan considerarse ortométricas (Rodríguez et al., 2005). Para esto hace uso de la ec. (1), donde ahora  $H$  representa la altura provista por cualquiera de los MDE mencionados.  $N$  es la ondulación geoidal derivada del modelo geopotencial EGM96, y  $h$  es la altura elipsoidal que resulta de la medición altimétrica propia de cada misión.

El modelo tdaGEOBA (Perdomo et al., 2012) ha sido masivamente utilizado en los últimos años en la provincia de Buenos Aires para transformar alturas elipsoidales medidas con GPS en el marco POSGAR07 (IGN, 2008) al sistema altimétrico nacional materializado por cotas altimétricas de mojones IGN de las redes de alta precisión, y en algunos pocos casos, topográficos.

El procedimiento ya utilizado en nuestro país (Simontacchi, 2011; Galvan, 2014) para mejorar el modelo SRTM3, pero sobre todo, para aproximarlos mejor al sistema altimétrico nacional, ha consistido en restar a las alturas SRTM3 el valor de la ondulación geoidal del EGM96 en cada punto, y sumar la contribución de un modelo local o un modelo global más ajustado al sistema altimétrico nacional.

En este caso, se propone desafectar los MDE del EGM96 y agregar la contribución del modelo de transformación de alturas tdaGEOBA. Para esto es necesario estimar y analizar las diferencias  $N_{tdaGEOBA-Negm96}$ , las cuales se muestran en la Figura 4.

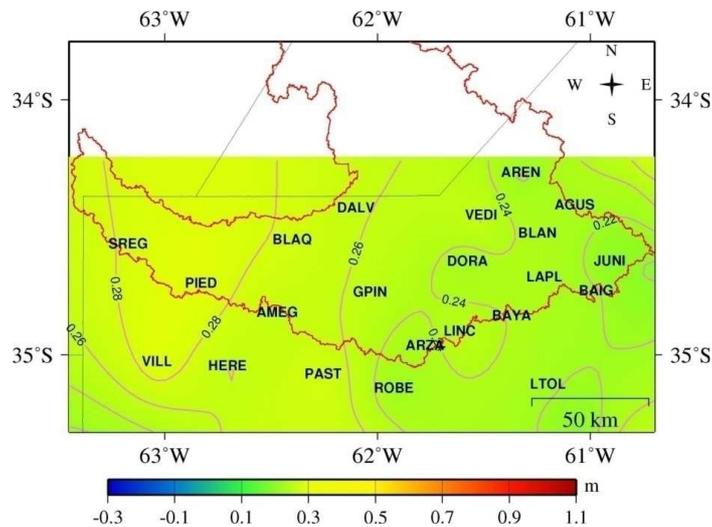


**Figura 4** Diferencias de ondulaciones geoidales, *NtdaGEOBA-Negm96*. Isolíneas cada 0,10 m.  
**Figure 4** *NtdaGEOBA-Negm96* geoid undulation differences. Level curves each 0.10 m.

La grilla mostrada en la Figura 4 fue obtenida a partir de la interpolación de las diferencias *NtdaGEOBA-Negm96* sobre los puntos de GPS/nivelación. El método de interpolación utilizado es el de mínima curvatura con tensión de 0,25, apropiado para la interpolación de observables del campo de la gravedad (Smith and Wessel, 1990). La diferencia con relación a *tdaGEOBA* es de 0,58 con un desvío estándar (DS) de 0,13 m acorde a los valores esperados para el EGM96. A diferencia de otras cantidades como las asociadas a la topografía, las ondulaciones geoidales y sus diferencias son cantidades que varían muy suavemente con el terreno.

Esta figura no muestra las diferencias sobre toda la subcuenca A1 porque al momento no se contaba con información. Si bien la variación de estas diferencias es suave, se aprecia un gradiente de sudeste a noroeste. Por ello, no debe extrapolarse en ningún caso esta corrección fuera de la región sin realizar un análisis particular en cada caso. Precisamente, dado que los puntos que contribuyen a *tdaGEOBA* ubicados más al norte son DALV, AREN, BLAQ y VEDI (Fig. 2), la extrapolación de este modelo al sur de Santa Fe merece una consideración particular.

Si se evalúa de la misma manera al modelo EGM08 (Pavlis et al., 2012), se tiene una diferencia promedio de 0,24 m con un DS de 0,04 m con respecto a *tdaGEOBA* (Fig. 5) obtenida sobre 65 puntos localizados en el noroeste de la provincia de Buenos Aires.



**Figura 5** Diferencias de ondulaciones geoidales, *NtdaGEOBA-Negm08*. Isolíneas cada 0,02 m.  
**Figure 5** *NtdaGEOBA-Negm96* geoid undulation differences. Level curves each 0.02 m.

En este caso, las variaciones son mucho menores que para el caso del EGM96 lo cual es respaldado por el trabajo de Pacino y Tocho (2009) que sugiere que este comportamiento se mantiene en la provincia de Santa Fe. Por esta razón, en la zona sur de esta provincia, se adoptó como valor de ondulación geoidal, equivalente a la producida por tdaGEOBA, a la del EGM08 corregido por los 0,24 m (ec. 2 b). De esta manera, las diferencias *Negm96-NtdaGEOBA* para toda la subcuenca A1 se construyen de la siguiente manera:

$$Negm96 - NtdaGEOBA = \begin{cases} Negm96 - NtdaGEOBA & (a) \text{ en } pcia. \text{ de } Buenos \text{ Aires} \\ Negm96 - \frac{(Negm08 + 0,24)}{Negm08 \text{ corregido}} & (b) \text{ en el sur de Santa Fe} \end{cases} \quad \text{ec. (2)}$$

A continuación se grafican las diferencias *Negm96- NtdaGEOBA* para toda la subcuenca A1, obtenidas usando la ec. (2). Estas serán utilizadas, más adelante, para cambiar la referencia vertical de los MDE.

### Obtención de un MDE para la ciudad de Junín

La vinculación de la información de las ménsulas con el resto del trabajo, requería de observaciones GPS sobre las mismas, por lo que se utilizó un nivel óptico marca Wild Heerbrugg, para trasladar su cota (*H*) a un punto auxiliar que fuera observable con GPS. En todos los casos, la observación y procesamiento de los datos GPS fueron realizadas en modo diferencial. Se observaron un total de 7 ménsulas bien distribuidas: 4 de la Dirección de Geodesia y 3 de Obras Sanitarias.

La metodología de trabajo fue la siguiente:

- elección de un punto cercano (aproximadamente 50 m) a cada ménsula que fue observado con GPS, doble frecuencia y en modo estático. Su coordenada fue referida a POSGAR07 a partir de un punto colocado en el predio del rectorado de UNNOBA (Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires) y que fue vinculado a este marco a través del punto JUNI perteneciente a la Red Geodésica de la Provincia de Buenos Aires.
- traslado de la cota de la ménsula al punto de observación GPS con un nivel óptico.

La doble información de altura sobre estos puntos auxiliares permitió estimar la ondulación del geoide sobre cada uno de ellos y compararla con la solución provista por tdaGEOBA. Esto permitió corroborar que las cotas de las ménsulas de Obras Sanitarias, presentan una diferencia sistemática de 0,550 m en el sentido ( $H_{OS} - H_{OIGN}$ ), que se corresponde con la diferencia que existe entre el “cero” del Ministerio de Obras Públicas (OMOP) y el “cero” del IGN (OIGN) que es de 0,556 m (<http://www.sspvvn.gov.ar/niveles%20de%20referencia.pdf>). Es decir, obedece a una diferencia de origen entre ambos sistemas de ménsulas.

A continuación, se decidió llevar todo al OIGN ya que esta conforma la referencia oficial.

Punto	$H_{obs} - H_{tdageoba}$ [m]	$\sigma_n$ GPS [m]	$\sigma_u$ GPS [m]	$\sigma_{niv}$ [m]
GE07	0,000	0,008	0,019	0,0020
GE23	2,214	0,007	0,012	0,0005
GE25	0,024	0,004	0,007	0,0015
GE32	0,019	0,007	0,013	0,0010
OS06	0,547	0,005	0,008	0,0000
OS25	0,565	0,005	0,01	0,0050
OS31	0,537	0,01	0,021	0,0005

**Tabla 1** Diferencias entre las alturas observadas y las obtenidas con tdaGEOBA sobre los puntos auxiliares a las ménsulas consideradas. También se indican los errores en horizontal ( $\sigma_h$ ) y vertical ( $\sigma_u$ ) de las coordenadas, y el asociado a la nivelación ( $\sigma_{niv}$ ).

**Table 1** Differences between the observed heights and those obtained with tdaGEOBA on the auxiliary points related to the considered altimetric information. Also the horizontal ( $\sigma_h$ ) and vertical ( $\sigma_u$ ) errors of the coordinates are indicated together with those associated to the leveling ( $\sigma_{niv}$ ) network.

El punto asociado a la ménsula GE23 ha sido excluido del análisis ya que tanto la observación de los datos GPS como los de nivelación no presentan errores que justifiquen esa diferencia. Estos posibles errores han sido descartados teniendo en cuenta distintos software y servicios de procesamiento GPS. En cuanto al desnivel obtenido, este tampoco justifica la diferencia que muestra la segunda columna de la Tabla 1. Se asume que existe un error en la cota provista o que la ménsula fue movida.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Verificación de la corrección propuesta a los MDE previo a su aplicación

En Julio de 2016 se midieron tres nuevos puntos altimétricos con GPS en el sur de Santa Fe, RUF1, TARR y SGRE con el fin de validar la extensión de tdaGEOBA a esa región (utilizando el EGM08 corregido; sección anterior). Las coordenadas quedaron referidas a POSGAR07 a través de la estación permanente RUF1 a la cual se vincularon las observaciones.

La Tabla 2 muestra la comparación entre las  $N$  observadas en dichos puntos y las *Negm08corregido*, lo que se traduce, de acuerdo con la ec. (1), en diferencias entre cotas IGN y las que resultan de la altura GPS elipsoidal transformada en ortométrica con el EGM08 corregido. El resultado es plenamente satisfactorio ya que estas diferencias en ningún caso alcanzan el cm.

Los resultados mostrados en la Tabla 2, permiten concluir que la metodología y la corrección propuesta (ec. 2 y Fig. 6) es apropiada y extrapolable a otras regiones siempre que se cuente con la información de ambos modelos geopotenciales globales y se tenga acotada la diferencia entre unos de ellos y los valores observados en regiones aledañas.

### Validación de los MDE

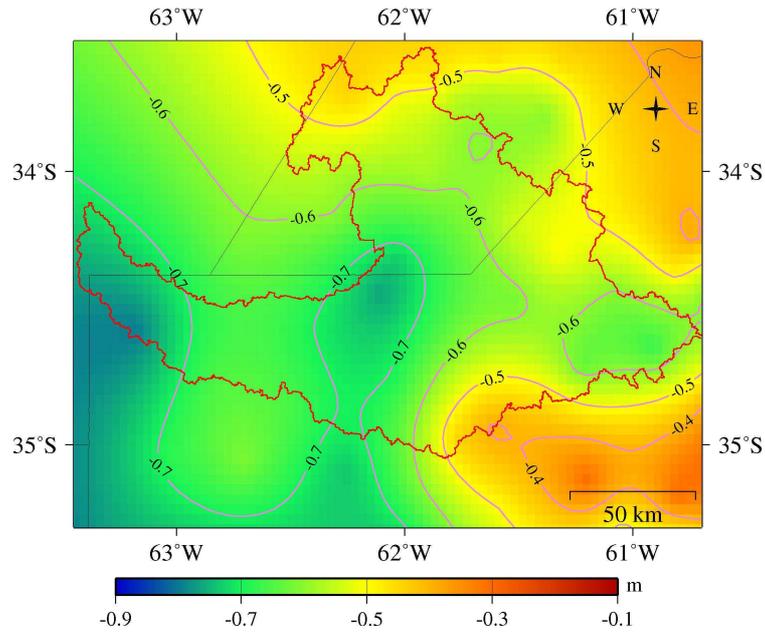
La selección del MDE está condicionada por los resultados de la evaluación sobre los GCP. El número, la calidad y distribución de los mismos condiciona según Li (1991) la fiabilidad con que se determinan estadísticos como la media y el desvío estándar. En el anexo se encuentran las fórmulas utilizadas aquí para estimar la fiabilidad del promedio y del desvío estándar.

Con relación a la calidad, el error de las coordenadas y la altura de los GCP son mucho menor al error de los MDE, de manera que no condicionan su estimación del error. En cuanto a la distribución, este es un aspecto un poco más subjetivo según Li (1991). En este caso se ha utilizado una distribución de puntos que cubre la región de análisis y con una equidistancia promedio de 300 km que se mantiene entre ellos. Con el fin de seleccionar un único modelo para determinar la morfología de la región, se utilizaron GCP ubicados en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Estos son 65 puntos de GPS/nivelación, con la calidad descrita más arriba y que permiten estudiar la calidad de los MDE en vertical tal como lo muestran Rodríguez et al. (2005) y en Argentina, Burgos (2009) entre otros. De los 65 puntos, sólo 25 se encuentran en la subregión A1 del PMRS, que constituye el 70% de subcuenca A1. Esta decisión de ampliar la región se debió a que las estadísticas son mejores y más representativas cuando se considera un número mayor de puntos.

Sobre los puntos se evaluaron las alturas arrojadas por los tres modelos seleccionados. La evaluación se realizó por medio de la herramienta *gdtrack* del software GMT v4.5.8 (Generic Mapping Tools - Smith and Wessel, 2012).

La Tabla 3 muestra los estadísticos de las diferencias a nivel de las alturas entre las derivadas de los MDE presentados y las de los puntos altimétricos.

Los resultados de la Tabla 3 son mejores que lo esperado para cada modelo. La estadística indica que de los tres modelos, el que mejores valores presenta es el SRTM3, le sigue MDE-Ar y muy por debajo de encuentra el modelo GDEM2. En la Figura 7 se aprecia el valor medio de las diferencias y el error lineal estimado, según anexo, con una probabilidad del 90%.



**Figura 6** Diferencias de ondulaciones geoidales *Negm96- NtdaGEOBA*. Isolinneas cada 0,1m.  
**Figure 6** *Negm96- NtdaGEOBA* geoid undulations differences. Level curves each 0.1 m.

Punto	Latitud	Longitud	h[m]	H [m]	<i>Nobs</i> [m]	<i>Negm08 corregido</i> [m]	$\frac{N}{(O-C)[m]}$
RUF1	-34° 15'50,9063"	-62° 41'19,6936"	135,210	115,901	19,305	19,300	0,005
SGRE	-34° 17'31,6836"	-62° 02'23,6546"	130,580	111,900	18,680	18,671	0,009
TARR	-34° 11'20,6648"	-62° 32'30,8147"	141,050	121,836	19,213	19,209	0,004

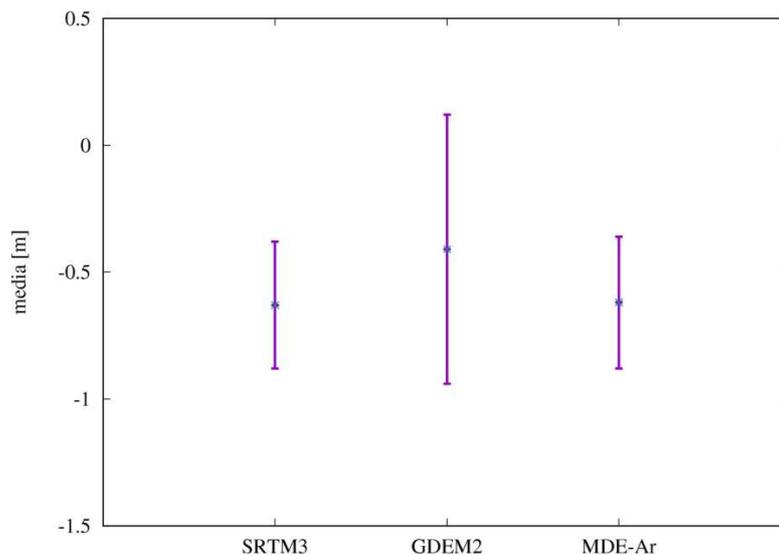
**Tabla 2** Se presentan los resultados de tres nuevos puntos acotados (con H IGN) en el sur de Santa Fe. La primera columna refiere a la designación del punto que guarda relación con la localidad más próxima; RUF1 en Rufino, SGRE cercano a San Gregorio y TARR frente a la estación Tarragona. Las siguientes tres columnas muestran las coordenadas elipsoidales calculadas en forma relativa a la estación fija RUF1 (red RAMSAC), a continuación la cota IGN (H) y luego la diferencia  $h - H$  denominada *Nobs*. La siguiente columna muestra el valor de ondulación geoidal calculado con el modelo EGM08 (corregido de +0,24 m) para estos puntos, y finalmente la diferencia entre el *Nobs* y *Negm08corregido*.

**Table 2** The results of three new altimetric points located in the south of Santa Fe province are shown. The first column refers to the designation related to the closest city, RUF1 in Rufino, SGRE near San Gregorio, and TARR in front of Tarragona station. The next three columns show the ellipsoidal coordinates calculated relative to the fixed station RUF1 (RAMSAC network), then the orthometric height (H) and then the  $h-H$  difference called *Nobs*. The next column shows EGM08 geoidal undulation (corrected from +0.24 m) for these points, and finally the difference between *Nobs* and *Negm08*.

Estadístico/valor	Hobs- $H_{SRTM3}$	Hobs- $H_{GDEM2}$	Hobs- $H_{MDE-Ar}$
DS [m]	1,40	6,70	1,58
Media [m]	-0,63	-0,41	-0,62
Máximo [m]	2,87	13,43	3,84
Mínimo [m]	-3,59	-23,17	-4,73
RMSE[m]	1,52	6,67	1,66
EL (90%)	0,25	0,53	0,26
Nro de puntos	65	65	65

**Tabla 3** Estadísticos de las diferencias entre las alturas derivadas del SRTM3, GDEM2, MDE-Ar y las de los GCP (Hobs). El representa el error lineal (ver Anexo).

**Table 3** Statistics of the differences between the heights derived from the SRTM3, GDEM2, MDE-Ar and those of GCP (Hobs). EL represents the linear error (see Appendix).



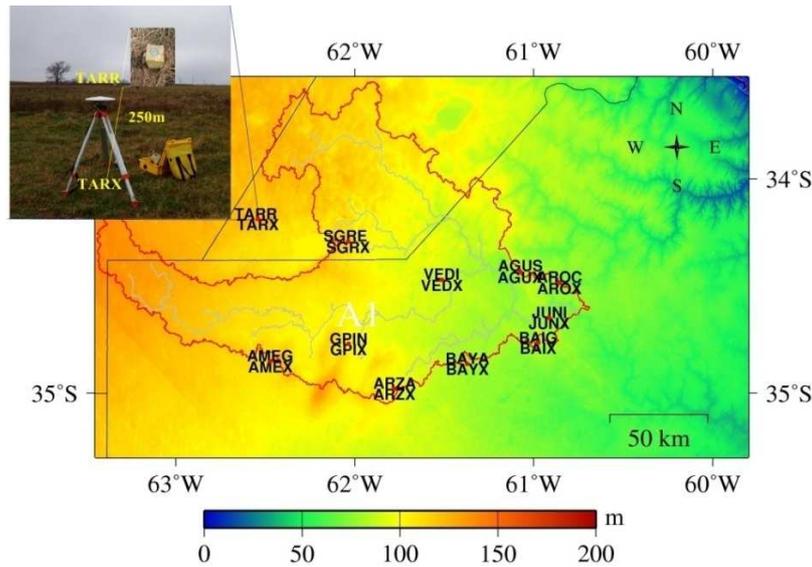
**Figura 7** Valor medio para los tres MDE con un intervalo de confianza con probabilidad del 90% del RMSE.  
**Figure 7** Mean value for the three selected DEMs with a confidence interval with 90% probability of the RMSE.

De acuerdo con lo mencionado en secciones anteriores, la diferencia promedio *NtdaGEOBA-Negm96* es de +0,58 m sobre toda la subcuenca A1. De la estadística sobre los 65 puntos (Tabla 3) se infiere que si se reemplaza la referencia vertical por aquella obtenida con *tdaGEOBA*, el valor promedio de las diferencias se reduce a 0,05m en el caso del SRTM3 (es decir, -0,63 m + 0,58 m) y también tiende a cero para el caso de GDEM2 y MDE-Ar.

En función de este análisis y el realizado sobre el modelo EGM96, a la grilla de alturas de cada MDE se le sumó una grilla de diferencias *Negm96-NtdaGEOBA* de igual tamaño y resolución que la del MDE en cuestión dando lugar a lo que llamaremos *MDE corregido* donde en este caso, MDE hace referencia al SRTM3, GDEM2 o MDE-Ar, según corresponda.

### Validación de los *MDE corregidos* y selección del MDE

La posibilidad de utilizar puntos con cota IGN para validar los MDE y estimar su precisión es una técnica ampliamente utilizada (Rodríguez et al., 2005; Rexer y Hirt, 2014; Gamett, 2010) y relativamente sencilla. Sin embargo, otros trabajos recientes sobre regiones llanas y libres de vegetación muestran que es posible esperar errores más pequeños (Simontacchi, 2011). Debido a que los puntos de GPS/nivelación se ubican próximos a los caminos, su cota no siempre es representativa del terreno circundante. Por eso, a estos puntos se le sumaron once (11) puntos auxiliares que se ubican a 200 a 300 m de los primeros, directamente sobre el terreno, lejos de vegetación alta y de construcciones de manera que su altura fuera representativa del terreno (Fig. 8). Estos fueron utilizados como GCP adicionales para evaluar cada uno de los *MDE corregido* y arrojaron los resultados que se muestran en la Tabla 4. En esta se presentan dos columnas (DH y DH2) por cada MDE. La primera incluye a los 11 puntos y la segunda (DH2) excluye a los puntos AGUX, GPIN y BAYX.



**Figura 8** Ubicación de los puntos auxiliares sobre la subcuenca A1. Se acompaña con una imagen que muestra la relación entre la ubicación de los puntos auxiliares y la de los de GPS/nivelación correspondientes.  
**Figure 8** Location of auxiliary points on A1 sub-basin A1. An image showing the relationship between the location of these points and that of the corresponding GPS/leveling points is also included.

De todas las diferencias mostradas en la Tabla 4 que superan el metro, las que corresponden a los puntos AGUX, GPIX y BAYX pueden justificarse como errores asociados no sólo a los modelos, sino también a la determinación de la cota observada. El punto AGUX presenta una observación de campo de terreno suavemente ondulado. Y esto queda corroborado porque la diferencia de cota observada entre el punto AGUS y AGUX, distante apenas un centenar de metros es de 2,40 m. Esto indica que la elección del punto de chequeo no fue acertada.

Punto	<i>SRTM</i> corregido		<i>GDEM2</i> corregido		<i>MDE-Arc</i> corregido	
	DH [m]	DH2 [m]	DH [m]	DH2 [m]	DH [m]	DH2 [m]
AMEX	0,61	0,61	4,67	4,67	-6,51	-6,51
AROX	1,18	1,18	-0,32	-0,32	0,14	0,14
ARZX	-0,53	-0,53	0,68	0,68	0,85	0,85
BAIX	0,46	0,46	4,56	4,56	1,01	1,01
BAYX *	-1,27		-2,82		0,06	
GPIX *	3,34		0,30		5,33	
JUNX	-0,31	-0,31	-3,97	-3,97	3,27	3,27
SGRX	1,26	1,26	-3,80	-3,80	-0,96	-0,96
TARX	0,84	0,84	3,91	3,91	0,42	0,42
VEDX	1,06	1,06	4,13	4,13	1,88	1,88
AGUX*	-3,23		2,09		-0,56	
MEDIA	0,31	0,57	0,86	1,23	0,45	0,01
DS	1,67	0,67	3,32	3,66	2,93	2,91

**Tabla 4** Estadística de las evaluaciones de los *MDE corregidos*. DH hace referencia a las diferencias entre la cota observada y la de los *MDE corregidos*, utilizando todos los puntos disponibles. DH2 representa lo mismo que DH pero habiendo eliminado de las estadística a los puntos AGUX, GPIX y BAYX marcados con (\*).

**Table 4** Statistics after the evaluation of the *corrected MDEs*. DH refers to the differences between the observed height and that of the *corrected MDEs*, using all available points. DH2 represents the same as DH but having eliminated AGUX, GPIX and BAYX points, marked with (\*).

El punto GPIX presenta la misma observación y BAYX en cambio no presenta ninguna observación dudosa, pero el punto BAYA, que es el punto a partir del cual se mide la cota de BAYX, está semienterrado, sin hierros de protección y podría haber sido cambiado de lugar.

Eliminando los puntos en cuestión el DS se reduce (Tabla 4, DH2), siendo inferior al metro para el caso del *SRTMcorregido*. Si bien este orden submétrico es lo que se está buscando, debería incrementarse el número de puntos de estas características para concluir que el error es del orden pretendido.

Naturalmente no describe las ondulaciones de “corta longitud de onda”, y debe ser utilizado para evaluar el terreno en términos de variaciones de nivel suaves y que se presenten a lo largo de algunos centenares de metros. Es el caso que se presenta generalmente en la zona de estudio.

En todos los casos, sin embargo, el promedio de las diferencias es de varias decenas de centímetros. También se observa que la calidad de MDE-Ar en la región no es superior a la de SRTM3, sino más bien son muy similares. Teniendo en cuenta este resultado y que el costo computacional es menor debido a su menor resolución, hemos optado por utilizar este último MDE en lo que resta del trabajo. No obstante, similares resultados deberían obtenerse con MDE-Ar.

### **Junin: zona urbana**

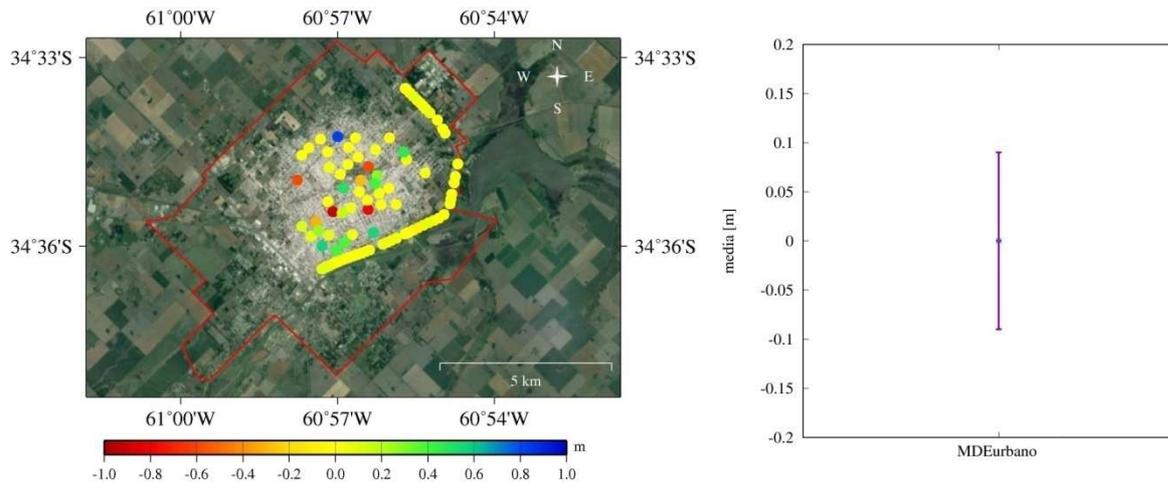
Una vez obtenidos los desniveles, las coordenadas, y definida la referencia vertical, el *MDEurbano* fue construido a partir de 55 ménsulas distribuidas en toda la ciudad de Junín y los puntos del trayecto cinemático cuya cota fue obtenida a partir del modelo tdaGEOBA. En los casos de cotas referidas al 0MOP, se corrigió por la diferencia MOP-IGN. La calidad final de estas cotas queda establecida a partir de la calidad estimada según tdaGEOBA (0,03 m).

La construcción del MDE a partir de puntos discretos, implicó un estudio sobre los métodos de interpolación. El software utilizado fue Generic Mapping Tools (GMT) v4.5.8 y los métodos estudiados fueron dos: “splines in tension” con tensión 0,75 según lo recomendado por el software para el tratamiento de datos de topografía (Wessel and Smith, 2012) y triangulación de Delaunay (Watson, 1982; Lee and Shachter, 1980), utilizando la misma versión de GMT. También se analizaron tensiones que van de 0,5 a 0,9.

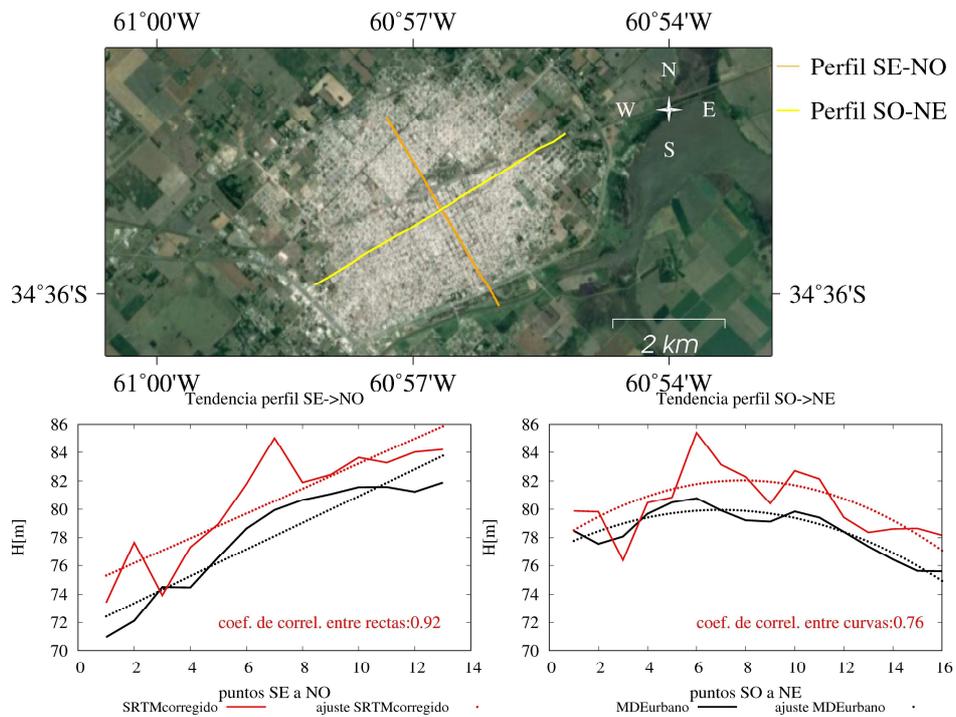
Para medir la capacidad de interpolación de cada método, se realizó un proceso de validación cruzada (Fotopoulos, 2003). El resultado de este procedimiento indicó que el método más apropiado era el de triangulación, siendo este el único que mostraba un desvío estándar de las diferencias, por debajo de 0,30 m sobre las diferencias. Así se construyó un *MDEurbano* de 50 m de resolución con una calidad en vertical apenas inferior a la deseada. En la Figura 9 se muestra la distribución espacial de los residuos de la validación y su valor medio con un intervalo de confianza con probabilidad del 95% del RMSE (0.22 m), asumiendo un error lineal (ver Anexo). De 122 puntos que conforman entre ménsulas y puntos del trayecto cinemático, el 50 % presentan diferencias con respecto a tdaGEOBA inferiores a los 0,14 m y el 82% inferiores a 0,16 m (ambas cantidades en valor absoluto).

Para cuantificar el acuerdo entre el *SRTMcorregido* y el MDE obtenido para la ciudad de Junín a partir de las ménsulas (*MDEurbano*), se generaron dos perfiles: uno en la dirección preponderante del gradiente de altura (SE->NO) y otro a 90 grados (SO->NE). En la parte superior de la Figura 11 se observa la dirección de ambos perfiles en el contexto de la ciudad de Junín. Debajo, se tienen las alturas del *SRTMcorregido* y las derivadas a partir de las ménsulas. Para cada perfil se graficaron las curvas (tendencias) que ajustan a cada uno y se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (Fig 10). Se aprecia un acuerdo muy satisfactorio entre perfiles, siendo mayor la que se obtiene en la dirección SE->NO.

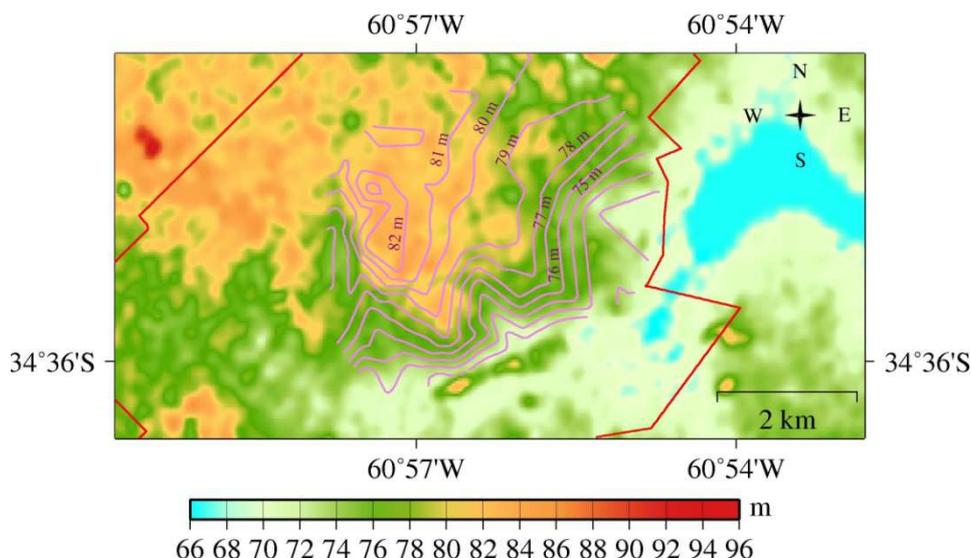
En la Figura 11, se aprecian las curvas de nivel obtenidas con la metodología descripta, sobre la topografía del *SRTMcorregido*. Se advierte una muy buena correlación entre los distintos niveles y la topografía del SRTM. Sobre la misma imagen se superpuso un trayecto cinemático.



**Figura 9** Distribución espacial de los residuos resultantes de la validación cruzada (izq.) junto su valor medio (der.) con un intervalo de confianza con probabilidad del 95% del RMSE (0,22 m).  
**Figure 9** Spatial distribution of the residuals as a result of the cross-validation process (left) together with its mean value (right) with a confidence interval with 95% probability of the RMSE (0.22 m).



**Figura 10** Comparación de los perfiles *SRTM* corregido y los del modelo de elevaciones elaborado a partir de las ménsulas en dos sentidos: SE ->NO y SO -> NE. Ambos muestran un acuerdo muy satisfactorio. Como era de esperar, el perfil SRTM está por encima unos 2 m debido al efecto de las construcciones en la zona urbana. (Datos del mapa: Google Imagery @2018, DigitalGlobe).  
**Figure 10** Comparison of the SRTM profiles and those of the elevation model obtained from the local altimetric points in the SE -> NO and SO -> NE directions. They show a satisfactory agreement. As it was expected, the SRTM profile is 2 m above due to the effect of the buildings in the urban area. (Map data: Google Imagery @2018, DigitalGlobe).



**Figura 11** Curvas de nivel obtenidas con la información altimétrica de las ménsulas y el trayecto cinemático, superpuestas sobre la topografía del *SRTMcorregido*. Esta figura es sólo ilustrativa porque no sería geoméricamente apropiado utilizar el *SRTMcorregido* en el casco urbano. En rojo se indican los límites de la ciudad de Junín.

**Figure 11** Level curves obtained from the local altimetric points and the kinematic path, superposed on the corrected SRTM3 topography. This figure is just illustrative because it would not be appropriate to use the corrected SRTM3 in urban areas. The border of the city is depicted in red.

Las alturas del *SRTMcorregido* se ubican 2 m por encima del *MDEurbano*, aun cuando el primero ya fue ajustado en la zona A1. Este es un comportamiento razonable, teniendo en cuenta que si bien las alturas del SRTM han sido referidas al “cero” del IGN, no excluye a las construcciones para el caso de las ciudades.

Una manera de integrar la información local con el *SRTMcorregido* es quitarle a éste la información dentro de la ciudad y reemplazar esta por la obtenida a partir de las ménsulas. Esto implicaría cambiar la resolución del *MDEurbano* y llevarla a 90 m, degradando su calidad; o aumentando la resolución del *SRTMcorregido* lo que no aporta mayor información pero permitiría integrar los modelos. Consideramos que esto va más allá de la propuesta para este trabajo y requiere un mayor análisis de la información y la metodología.

Por otra parte, la doble información de alturas de las ménsulas (de nivelación y elipsoidal) no sólo permite agregar detalle al *MDEurbano*, sino que permitiría elaborar un modelo de transformación de alturas propio para la ciudad, compatible con el existente para la provincia. Esto significa que si se cuenta con información geodésica referida a POSGAR07 en cualquier lugar de la ciudad, se podría obtener su cota referida al “cero” del IGN.

## CONCLUSIONES

En la subcuenca A1 se estudiaron las discrepancias entre la altura de tres MDE globales y la altura provista por 65 puntos de GPS/nivelación que se utilizaron como GCP. Esta discrepancia resultó del orden de los 0,60 m con una fiabilidad del 90%, siendo el modelo SRTM3 el que menor desvío presentó. Esto derivó en una corrección relacionada con el origen vertical de las alturas, es decir, el modelo de geoide. Debido a que la subcuenca A1 incluye el sur de la provincia de Santa Fe y originalmente no se contaba con GCP en la región, se desarrolló una metodología para extender la corrección de origen a toda la subcuenca. El promedio de la corrección es de aproximadamente 0,60 m con para los tres modelos lo que reduce las discrepancias originales a valores cercanos al cero.

Por otra parte, la inclusión de tres puntos al Sur de Santa Fe permitió corroborar que la metodología propuesta para extender las correcciones era apropiada siendo que los residuos de las diferencias entre las ondulaciones geoidales estimadas y las observadas son menores al centímetro.

La calidad de los *MDE corregidos* fue evaluada a partir de 11 GCP bien distribuidos en zonas rurales, llanas y libres de vegetación. La estadística, aunque menos robusta que las anteriores, volvió

a indicar que el MDE que mejor representa la topografía es el SRTM3, ahora en su versión *SRTMcorregido*. Este análisis da indicios de que la precisión que puede alcanzarse haciendo uso de este último MDE es cercana al metro en zonas rurales.

Para el casco urbano de la ciudad de Junín se generó un MDE a partir de la información de 55 ménsulas y de observaciones GPS cinemáticas cuya cota fue obtenida a partir del modelo tdaGEOBA. Estos mismos puntos funcionaron como GCP a través de un proceso de validación cruzada que arrojó residuos con promedio cero y DS de 0,22 m con una fiabilidad del 95%.

Por otra parte, las mediciones llevadas a cabo en la ciudad indican que no sólo es posible generar el *MDEurbano* sino también sería posible incluir la información altimétrica en un modelo como tdaGEOBA y así contar con otra herramienta que permita brindar alturas con un error menor a la que se obtiene a partir de los MDE mencionados.

## REFERENCIAS

Beumier, C., y Idrissa, M. (Enero de 2015). Deriving a DTM from a DSM by uniform regions and context. *EARSeL eProceedings* 14.

Burgos, V. H. (2009). Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C/X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal, Mendoza. Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino. Recuperado de [https://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/03\\_003\\_Burgos.pdf](https://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/03_003_Burgos.pdf)

Castillo, E. B., Chichiple, M. E., y Salas López, R. (2015). Comparación de los MDE ASTER y SRTM en el análisis morfométrico de la cuenca del Utcubamba (Perú). *INDES*, 3(1), 86-98.

Díaz, G. M., Gómez, M., Deccechis, F., Lencinas, J. D., y del Valle H. F. (2010). Evaluación de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM y su relación con los errores planimétricos de datos pancromáticos quickbird ortorrectificados. Laboratorio de Percepción Remota y SIG. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP). Recuperado de [http://ciefap.diamo.com.ar/media/publications/D%C3%ADaz\\_et\\_al\\_20102.pdf](http://ciefap.diamo.com.ar/media/publications/D%C3%ADaz_et_al_20102.pdf)

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. doi: 10.1029/2005RG000183

Fan, L., Smethurst, J., Atkinson, P., y Powrie, W. (2014). Propagation of vertical and horizontal source data errors into a TIN with linear interpolation. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(7), 1378-1400. doi: 10.1080/13658816.2014.889299

Felícísimo, A. M. (1994). Modelos Digitales de Terreno Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa Ediciones.

Fotopoulos, G. (2003). *An analysis on the optimal combination of geoid, orthometric and ellipsoidal height data*. (PhD Thesis). University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, Canada.

Galván, L. (2014). *Análisis y ajuste de modelos digitales de elevaciones en la región central de La Argentina. Integración de modelos geopotenciales e información altimétrica local*. (Tesis de Magister). Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Gamett, B. J. (2010). *An Accuracy Assessment of Digital Elevation Data and Subsequent Hydrologic Delineations in Low Relief Terrain: An Analysis for Idaho's Little Lost River Valley*. (Tesis de Magister), Idaho State University, USA.

Gaspari F. J., Rodríguez Vagaría A. M., Senisterra G. E., Denegri G., Delgado M. I., y Besteiro S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158.

Gómez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaría, A. M., Tavarone, M. F., y Senisterra, G. E. (2017). Modelos digitales de elevación: correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geologica Lilloana*, 29(1), 39–51.

IGN. (2014). Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina–MDE-Ar. Recuperado de <http://www.ign.gob.ar/content/nuevo-modelo-digital-de-elevaciones-para-la-rep%C3%BAblica-argentina>

IGN. (2008). Marco de referencia Geodésico POSGAR 07. Recuperado de [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol13/21\\_Marco\\_de\\_Referencia\\_Geodesico\\_Posgar\\_07\\_Cimbaro.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol13/21_Marco_de_Referencia_Geodesico_Posgar_07_Cimbaro.pdf)

Heiskanen, W., y Moritz, H., (1967). *Physical Geodesy*. San Francisco and London: W. H. Freeman and Company.

- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816-821. doi: 10.1038/nclimate1911
- Krabill, W. B., Collins, J. G., Link, L. E., Swift, R. N., y Butler, M. L. (1984). Airborne laser topographic mapping results. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50(6), 685-694.
- Kenyon, S., Factor, J., Pavlis, N., y Holmes, S. (2007). Towards the next earth gravitational model. Recuperado de [http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/new\\_egm/EGM08\\_papers/EGM-2007-final.pdf](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/new_egm/EGM08_papers/EGM-2007-final.pdf)
- Lee, D. T., y Schachter, B. J. (1980). Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation. *International Journal of Computer & Information Sciences*, 9(3), 219-242. doi: 10.1007/BF00977785
- Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, et al. (1998). The development of the joint NASA/GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt USA.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., y Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30. doi: 10.1002/hyp.3360050103
- MOSP. (1999). Plan Maestro Integral Cuenca del Río Salado (PMRS). Recuperado de <http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/planmaestro.php>
- O'Loughlin, F. E., Paiva, R. C. D., Durand, M., Alsdorf, D. E., y Bates, P. D. (2016). A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sensing of Environment*, 182, 49-59. doi: 10.1016/j.rse.2016.04.018
- Oñate-Valdivieso, F., y Bosque Sendra, J. (2007). Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas. Teledetección: Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional (pp. 457-464). Martín.
- Pacino, C., y Tocho C. (2009). Validation of EGM2008 over Argentina. SIRGAS Report. Recuperado de [www.isgeoid.polimi.it/Report\\_A4\\_Argentina](http://www.isgeoid.polimi.it/Report_A4_Argentina)
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., y Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008): THE EGM2008 EARTH GRAVITATIONAL MODEL. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4), n/a-n/a. doi: 10.1029/2011JB008916
- Perdomo, R., Del Cogliano, D. H., Mendoza, L. P. O., Gomez, M. E., y Bagu, D. R. (2012). Servicio de Transformación de alturas en Buenos Aires tdaGEOBA. Recuperado de <http://geoweb.fcaglp.unlp.edu.ar/tdaGEOBA/>
- Rexer, M., y Hirt, C. (2014). Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2.1/v4.1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(2), 213-226. doi: 10.1080/08120099.2014.884983
- Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J. E., Chapin, E.C., Martin, J. M. y Daffer, W. (2005). *An assessment of the SRTM topographic products* (Technical Report JPLD-31639). Recuperado de [https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_D31639.pdf](https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf)
- Rodríguez, E., Morris, C. S., y Belz, J. E. (2006). A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 249-260. doi: 10.14358/PERS.72.3.249
- Simontacchi, L. (2011). *Referencias altimétricas en La Plata, Berisso y Ensenada*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Argentina.
- Smith, W. H. F., y Wessel, P. (1990). Gridding with continuous curvature splines in tension. *GEOPHYSICS*, 55(3), 293-305. doi: 10.1190/1.1442837
- NASA. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 - summary of validation results. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Recuperado de [https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary\\_GDEM2\\_validation\\_report\\_final.pdf](https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf)
- Valenti, C. (2012). *Análisis de la versión 2011 del modelo de transformación de alturas de la Provincia de Buenos Aires*. (Tesis de Licenciatura en Astronomía) Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Watson, D. F. (1982). Acord: Automatic contouring of raw data. *Computers & Geosciences*, 8(1), 97-101. doi: 10.1016/0098-3004(82)90039-5

Wessel P., y Smith, W.H. F. (2012). The Generic Mapping Tools Technical Reference and Cookbook, Version 4.5.8. Recuperado de [https://www.soest.hawaii.edu/gmt/gmt/pdf/GMT\\_Docs.pdf](https://www.soest.hawaii.edu/gmt/gmt/pdf/GMT_Docs.pdf)

Recibido: Noviembre, 2017

Aceptado: Octubre, 2018

## ANEXO (APPENDIX)

### A. Fórmulas para calcular la exactitud en vertical

$$\text{error}z_i = zm_i - z_i \quad \text{ec. (a1)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \text{error}z_i^2}{n}} \quad \text{ec. (a2)}$$

Donde  $z_i$  representa la altura medida para el punto  $i$ , y  $zm_i$  es la correspondiente altura obtenida a partir del MDE; RMSE representa el error cuadrático medio

Suponiendo que las diferencias responden a una distribución normal con media cero o aproximada, el error lineal (EL) con una probabilidad del 90% y 95 % está dado por las ecuaciones a3 y a4, respectivamente.

$$EL(90\%) = 1.64 \sqrt{RMSE} \quad \text{ec. (a3)}$$

$$EL(95\%) = 1.96 \sqrt{RMSE} \quad \text{ec. (a4)}$$

### B. Fiabilidad de los estimadores según el tamaño de la muestra

De acuerdo con Li (1991) el número de puntos ( $n$ ) necesarios para calcular la media con error  $S$ , siendo  $Zr$  la fiabilidad y  $DS$  la desviación estándar de la muestra, esta dado por la ec. b1:

$$n = \frac{Zr^2 DS^2}{S^2} \quad \text{ec. (b1)}$$

Y la fiabilidad con la que se puede estimar el DS se puede calcular con la siguiente expresión:

$$R(DS) = \frac{1}{\sqrt{2(n-1)}} \times 100\% \quad \text{ec. (b2)}$$