

Modelos digitales de elevación: correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura

María E. GÓMEZ^{*1,3}, Fernanda J. GASPARI², Raúl A. PERDOMO^{1,3}, Lautaro E. SIMONTACCHI¹, Fabio A. MONTEALEGRE MEDINA², Alfonso M. RODRÍGUEZ VAGARIA², María F. TAVARONE¹, Gabriela E. SENISTERRA²

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.

² Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

* Email de contacto: megomez@fcaglp.unlp.edu.ar

► **Resumen** — La representación del movimiento del agua sobre el terreno hacia los cauces se genera a partir del procesamiento de mapas topográficos en un entorno de sistemas de información geográfica y teledetección. El objetivo del trabajo fue la definición de un sistema de drenaje superficial en una cuenca de llanura a partir del modelo digital de elevación global ajustado geodésicamente en el norte de la cuenca del Río Salado (subregión A1). Como información base se utilizaron capas vectoriales de drenaje e información de topografía del SRTM90. Este último ha sido ajustado geodésicamente a través de información geodésica de GPS y nivelación. Con el SRTM corregido y la herramienta Arc Hydro Tools se logró definir un sistema de drenaje que involucra la subregión A1 corregida. Por último se realizó un análisis multitemporal de cuerpos de agua, provenientes de distintas fuentes de información nacional (IGN) e internacional (Observatorio de Inundaciones Dartmouth, USA). Este procesamiento permitió diferenciar su ocupación superficial durante periodos de estiaje o inundación y permite la toma adecuada de decisiones en relación a la prevención o mitigación de alertas en una zona llana; en especial en lugares con proximidad a zonas pobladas o agropecuarias. Se concluye que a medida que se detallan las características topográficas de una zona, con correcciones geodésicas con datos de campo, es posible delimitar con mayor precisión a una cuenca hidrográfica junto con su sistema de drenaje superficial.

Palabras clave: Sistema de drenaje, cuenca del Río Salado, SRTM90, ajuste altimétrico.

► **Abstract** — “Digital elevation models: altimetric corrections for hydrological usage in flat areas”. The representation of water movement on the ground towards the courses of water is generated from the processing of topographic maps in an environment of geographic information systems and remote sensing. The objective of this work was to define a surface drainage system in a plain basin based on a geodetically adjusted digital elevation model in the north of the Salado River Basin (A1 region). Drainage vector layers and the SRTM90 topography information were used as primary data. The latter has been geodetically adjusted through GPS and levelling information. With the corrected SRTM and the Arc Hydro Tools, it was possible to define a drainage system that involves the corrected A1 region. Finally, a multi-temporal analysis of water bodies, from different sources of national (IGN) and international information (Dartmouth Flood Observatory, USA) was carried out. This allowed differentiating its surface occupation behavior during dry or flood periods, and contributes to taking the appropriate decision to prevent or mitigate alerts from the rising of water bodies in a flat area of similar extension; especially in places close to populated or agricultural areas. It is concluded that as the topographic features of a region are detailed and corrected by means of geodetic data, it is possible to delimit a watershed together with its surface drainage system with more precision.

Keywords: Drainage system, Rio Salado basin, SRTM90, altimetric adjustment.

INTRODUCCIÓN

La dinámica temporal y espacial de una cuenca hidrográfica es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación y está íntimamente ligado a la relación entre aguas superficiales y subterráneas (Gaspari *et al.*, 2009).

La representación del movimiento del agua sobre el terreno hacia los cauces se genera a partir de la aplicación de modelos cartográficos con mapas topográficos en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG) y algunos modelos hidrológicos e hidráulicos.

Los modelos hidrológicos son una herramienta útil para la evaluación y análisis de los recursos hídricos. Constan de entradas y salidas que consisten en variables hidrológicas mensurables conectadas por medio de ecuaciones (Chow *et al.*, 1994). Al ser una representación incompleta de la realidad, se debe definir de manera clara el objetivo para el cual es aplicado, la exactitud de la respuesta a las simulaciones y las variables de entrada que utiliza (según disponibilidad de base datos, costo y tiempo para su relevamiento).

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica proporcionan una descripción física espacial que permite realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas (Gaspari *et al.*, 2009), aportando los datos básicos para los modelos hidrológicos. Al mismo tiempo, pueden proporcionar conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales (Henaos, 1988), como así también, la estimación de variables hidrológicas asociadas que permitan evaluar procesos y eventos extremos (inundaciones, sequías, desertificación). Estos últimos son temas de primer orden en la gestión y administración del territorio, cuya inclusión en la agenda política conducen a la toma de decisiones inteligentes sobre un espacio determinado.

Otra herramienta de importancia en la modelización hidrológica, es la observación

remota de la superficie terrestre que constituye el marco de estudio de la teledetección. En sentido amplio, la teledetección no engloba solo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación (Chuvieco, 2002). La teledetección es el sistema integral de captura de información territorial (a partir de la radiación electromagnética captada por el sensor) que se emplea cada día con mayor asiduidad para la captura tanto de información temática (medioambiental), como de información topográfica (modelo digital de elevación, planimetría) (Arozarena *et al.*, 1989). De acuerdo con Díaz *et al.* (2010), la teledetección espacial es una importante fuente de datos para derivar a un MDE.

El uso conjunto con los modelos de proyección cartográfica es relativamente confiable, debido a la eficacia y exactitud espacial que le otorga el uso de bases de datos geográficos, integrados a un SIG. Estos modelos se han transformado en una herramienta de análisis espacial que permite explorar los mecanismos hidrológicos, ambientales y socioeconómicos que utilizan parámetros simples/complejos. También permiten visualizar patrones, relaciones y tendencias de los cambios espacio - temporales, proporcionando una perspectiva dinámica de la información para la toma de decisiones tendientes al ordenamiento territorial. Por tal razón, al realizar procesos de ajuste a la información base con datos tomados en campo, considerando las características particulares de una zona de llanura, es posible ajustar con mayor precisión los resultados y la información topográfica e hidrológica de la cuenca hidrográfica.

En el caso de áreas llanas, se presenta la situación de que los mapas topográficos no siempre coinciden con los mapas hidrológicos debido a su poco gradiente de pendiente y las geoformas presentes, generando interpretaciones erróneas de la dirección de los flujos superficiales y por ende la delimitación de las cuencas por divisorias de aguas.

Para resolver esta situación se aplican metodologías de ajuste de cotas en un mo-

delo digital de elevación (MDE) por medio de la combinación de datos topográficos con hidrográficos.

Las cotas provistas por un MDE de cobertura global obtenido por teledetección, están afectadas no sólo por errores propios de la técnica con la que se obtienen, sino también presentan, entre otros, diferencias de tipo sistemática como el origen de las mismas alturas (Rodríguez *et al.*, 2005). En el mejor de los casos, estas diferencias de origen resultan constantes siendo su corrección inmediata, sin embargo en otros casos es variable. Esta variabilidad si bien puede aumentar hacia zonas montañosas, también puede estar presente en zonas llanas lo cual agrega complejidad al estudio hidrológico (Díaz *et al.*, 2010).

Una manera de controlar estas diferencias, es a través de puntos con información geodésica (Rodríguez *et al.*, 2006). Estos permiten estimar los apartamientos entre las alturas derivadas de un MDE global y las observadas, como también el origen de los mismos. Las alturas obtenidas con esta técnica carecen de significado físico por lo que su reducción a alturas ortométricas o de tipo físico, requiere de un modelo de geode

el cual tiene relación con la distribución de masas topográficas. Cuanto mejor sea este modelo, mejor será la determinación de la topografía. Es importante mencionar que en la obtención de alturas derivadas de interferometría radar, como en otras técnicas (Lidar, fotogrametría, etc), siempre interviene el posicionamiento con GPS (Global Positioning System).

Los modelos y la metodología que se presentan a continuación tienen por objetivo la definición de un sistema de drenaje superficial en una cuenca de llanura a partir del MDE global ajustado geodésicamente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área en estudio fue la subregión A1 de la cuenca del Río Salado en la región Pampa húmeda bonaerense, específicamente en la Pampa Deprimida. Es una región de llanuras con un relieve muy suave, casi horizontal, cubierta de depresiones locales, donde las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan formando encharcamientos poco profundos y bañados, según describe el Plan Maestro del Río Salado (PMRS) (MOSP, 1999).

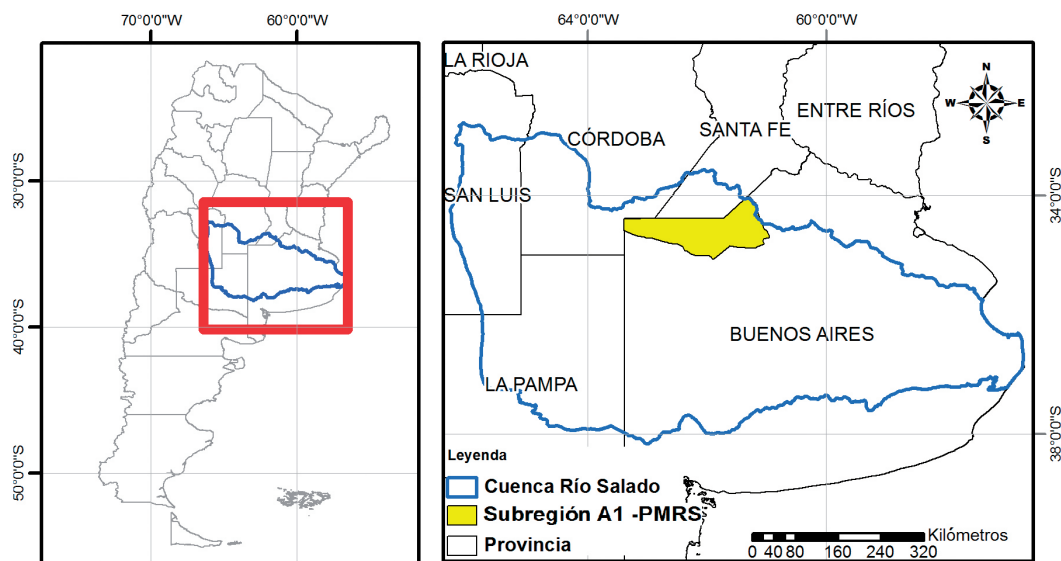


Figura 1. Ubicación de la subregión A1 según PMRS y la cuenca del Río Salado completa. Argentina.

La Figura 1 muestra el límite de la subregión A1 que abarca una superficie de 12.427,81 km² según el PMRS, distribuida sólo en la provincia de Buenos Aires. También se presenta la delimitación completa de la Cuenca del Río Salado definida por el grupo de investigadores para el presente trabajo.

La metodología aplicada se basó en cuatro etapas, donde se planteó una secuencia que se inicia con el procesamiento de datos de cartografía base topográfica con herramientas SIG, hasta la definición de áreas inundables con imágenes satelitales.

I. CARTOGRAFÍA BASE ANTECEDENTE: EL MDE E HIDROGRAFÍA

Para el análisis de la topografía se consideró el modelo digital de elevaciones SRTM90 v.4, obtenido del sitio del Consorcio de Información Espacial (CGIAR-CSI) que ha sido pionero en la aplicación de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos (RS) para el desarrollo agrícola sostenible por más de una década (CGIAR-CSI, 2004).

El SRTM90 fue obtenido a partir de la misión Shuttle Radar Topography (SRTM). Se trata del MDE de más alta resolución de la superficie terrestre con tecnología radar, con una resolución de 30 m para Estados Unidos y 90 m para el resto del mundo (Farr *et al.*, 2007). Este modelo constituye una grilla con cobertura global de alturas ortométricas referidas al geoide del modelo geopotencial global EGM96 (Lemoine *et al.*, 1998). Las alturas del SRTM90 tienen un error nominal de 16 m pero en regiones llanas, como la provincia de Buenos Aires, este error puede ser inferior, llegando a los 3 m (Galván, 2012).

La cartografía base del sistema de drenaje se obtuvo a partir de capas temáticas de acceso libre en la web del Instituto Geográfico Nacional y de la Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina (IDERA, 2007) que publica datos, productos y servicios de información geoespacial, de manera eficiente y oportuna, como un aporte

fundamental a la democratización del acceso a la información producida por el Estado y diversos actores. Esta capa de información representa los cuerpos de agua y drenajes superficiales georreferenciados. La misma fue procesada con el programa ArcGIS 10® para definir y caracterizar morfométricamente la cuenca. El límite de la subregión A1 utilizado de base es el definido por el PMRS (MOSP, 1999).

II. CORRECCIÓN ALTIMÉTRICA

II.1. Observaciones de GPS/nivelación.—

Con el objeto de calibrar y mejorar el modelo SRTM90 en la región en estudio, se realizaron campañas de observación GPS sobre 11 puntos de nivelación pertenecientes a la red altimétrica del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Parte de estos puntos se ubican en el sur de la provincia de Santa Fe y sus observaciones fueron tomadas con equipos GPS geodésicos de doble frecuencia. El procesamiento se realizó en modo diferencial y las coordenadas finales están referidas al marco de referencia nacional Posiciones Geodésicas Argentinas 2007 (POSGAR 07) (IGN, 2009). Las alturas geodésicas (h) obtenidas tienen un error del orden de los 3 cm, producto del marco de referencia y la metodología empleada, lo que permite integrar estas observaciones a la existente en la región. Esta última forma parte de los trabajos de Gómez *et al.* (2006) y Perdomo *et al.* (2012), los que aportan información del mismo tipo sobre el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Se tiene entonces un total de 65 puntos con datos de GPS y nivelación, de los cuales 25 se ubican en la subcuenca A1. La incorporación de estos puntos brinda robustez a la determinación de las diferencias al mismo tiempo que garantiza la continuidad de las mismas entre la provincia de Buenos Aires y el sur de Santa Fe.

Las mediciones GPS sobre puntos de nivelación, permiten obtener lo que se conoce como ondulación geoidal (N) mediante la ecuación de Heiskanen & Moritz (1967) (Ecuación 1) donde expresan que siendo H, la altura ortométrica, entonces:

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

En el presente estudio, al tratarse de observaciones directas sobre puntos de la red de nivelación argentina, las alturas ortométricas están vinculadas a la referencia altimétrica nacional (OIGN), a diferencia de las alturas derivadas del SRTM90. Esta ecuación es de fundamental importancia para corregir el modelo SRTM.

II.2. Ajuste por puntos de nivelación.— Las alturas del SRTM90 no están vinculadas a la referencia altimétrica argentina, y considerando que cualquier obra hidráulica o análisis hídrico debe realizarse en base a alturas vinculadas a la referencia nacional (OIGN), se planteó que con la ecuación de Heiskanen & Moritz (1967) se definen las alturas del SRTM90 para Argentina según la Ecuación 2.

$$H_{srtm} = h - Negm96 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo H_{srtm} , la altura ortométrica referida al geoide del EGM96 definida por h (altura geodésica, que se obtiene con GPS) y por $Negm96$ que es la ondulación geoidal proporcionada por el modelo EGM96.

De las ecuaciones 1 y 2, se desprende que la corrección a las alturas del SRTM se puede obtener aplicando la diferencia $Negm96$ -Nobs, correspondiendo Nobs a las ondulaciones geoidales observadas, es decir, obtenidas a partir de datos de campo. Teniendo en cuenta que la resolución del SRTM es de 90 m, las correcciones arriba mencionadas se aplicaron a partir de una grilla cuya cobertura y resolución son las mismas que para el SRTM en su versión original.

La aplicación de este procedimiento dio lugar al SRTM corregido (en adelante, SRTMc).

III. COMPROBACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE CON SRTMc

La capa vectorial utilizada fue la hidrografía (cursos y cuerpos de agua), mencionada en I, referenciada en coordenadas

geográficas en el Sistema WGS 84, Marco de Referencia POSGAR 07. A partir de esta capa se aplicó la herramienta de Arc Hydro Tools, que analiza los MDE permitiendo estimar variables que aumentan la eficiencia en el procesamiento de los modelos geoespaciales, la efectividad y la precisión del estudio aplicados a la simulación hidrológica. Esta herramienta es de carácter geoespacial y temporal, desarrollada por el Centro de Investigaciones en recursos de agua de la Universidad de Texas, Estados Unidos, bajo entorno de ArcGIS® (ESRI, 2011).

El procesamiento con Arc Hydro se aplicó al SRTMc para identificar el patrón de drenaje superficial y sus derivados, que se utilizaron para la delineación eficiente de los límites rectificados de la subcuenca hidrográfica A1 y la generación de redes de flujo. También se aplicaron para derivar varios conjuntos de datos que describieron colectivamente los patrones de drenaje de la subcuenca. El análisis raster se realizó para generar datos sobre la dirección del flujo, la acumulación de flujo, la definición de cursos de agua corregidos y definición de cuerpos de agua, como ser lagunas.

La comprobación de la distribución geoespacial se realizó aplicando las capas vectoriales del sistema de drenaje generado por el IGN sobre los cursos de agua corregidos.

IV. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN DE INUNDACIONES

A partir de la identificación y delimitación de las lagunas con el SRTMc, se planteó integrar a este nuevo límite las modificaciones en tamaño espacio temporal que se producen por el efecto de situaciones extremas, como ser el caso de inundación y sequía. Para ello se definieron fechas que representen estas dos situaciones hidrológicas en la A1, a partir del análisis de series históricas de precipitaciones diarias entre 2012 y 2015, con datos otorgados por el Servicio Meteorológico Nacional para la estación Junín (SMN, com. pers.) Estas situaciones hidrológicas caracterizan tres estadios: sequía, inundación y estado intermedio.

Estos tres estadios climáticos se contrastaron con los datos del monitoreo diario del agua de la superficie terrestre, disponible en el Observatorio de Inundaciones Dartmouth (Dartmouth Flood Observatory, DFO) de la Universidad de Colorado (USA). Esta base de datos internacional otorga información espacial para la detección de inundaciones, la respuesta a inundaciones, la evaluación de riesgos futuros y la investigación hidrológica, siendo base de un proyecto de Ciencias Aplicadas de la NASA para ayudar al Programa Mundial de Alimentos (2013-2017), (DFO, 1993). Este monitoreo diario permite determinar límites entre agua y suelo, y detectar presencia de agua superficial a partir de la interpretación de información de Terra-MODIS y Aqua-MODIS, disponible en el sitio web del DFO.

Otra herramienta utilizada fue Google Earth © que proporciona imágenes de dis-

tinta época para una misma región, y a partir de éstas se analizaron los límites de la ocupación de los cuerpos de agua para las mismas fechas estudiadas, con el fin de identificar y corroborar el monitoreo DFO.

Por último se realizó un diagnóstico de las variaciones entre la superficie de ocupación de cuerpos de agua definidos como bañados, considerando que son tierras bajas, inundables, cercanas a ríos, arroyos o lagunas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I. CARTOGRAFÍA BASE ANTECEDENTE: EL MDE Y EL SISTEMA DE DRENAJE

En la Figura 2.1 se presenta la base cartográfica con la delimitación de la subregión A1 planteada por el PMRS y de las capas temáticas de referencia con información hidrográfica de la cartografía oficial producida por el IGN, en el SIG250 (IGN, 2013).

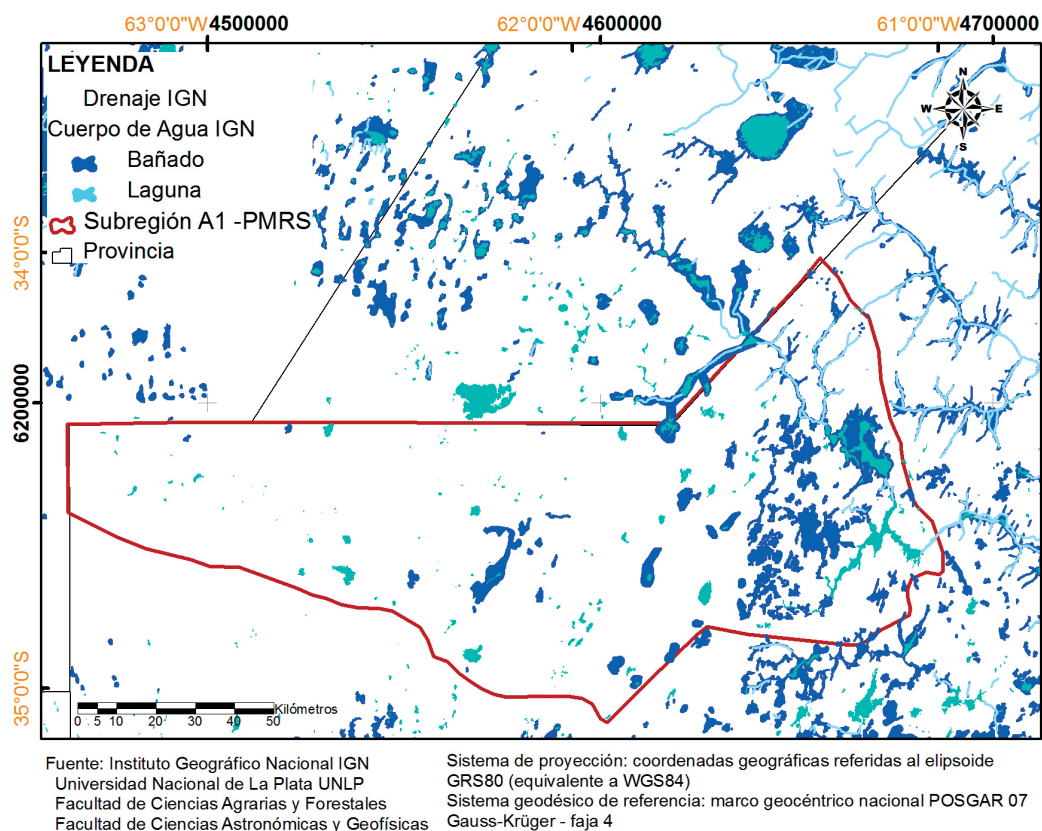


Figura 2.1. Ubicación de la subcuenca A1 según PMRS y sistema de drenaje superficial de IGN.

El análisis de la topografía con el SRTM90 v.4, permitió definir a partir de la subregión A1 a la unidad hidrológica subcuenca A1 (Figura 2.2), en la que puede observarse que la mayor elevación corresponde a 170 msnm y la menor a 50 msnm. Esta información permitió definir los cursos de agua superficiales, plantear el comportamiento del agua y la composición de las cuencas.

II. CORRECCIÓN ALTIMÉTRICA

II.1. Observaciones de GPS/nivelación.—

La estadística de las diferencias entre las alturas del SRTM90 y las de la red de nivelación (HIGN), arrojan un desvío estándar de 1,62 m, con un promedio de 1,11 m en el sentido (Hsrtm- HIGN). Estos valores fueron obtenidos sobre los 65 puntos localizados entre el noroeste de la provincia de Buenos Aires y sur de Santa Fe.

Si se analizan las diferencias entre las ondulaciones derivadas del EGM96 y las ondulaciones observadas en la subcuenca A1 sobre los 25 puntos que se ubican en la misma, se tiene un desvío estándar de 0,10

m y un promedio de -0,62 m en el sentido (Negm96 -Nobs). Estos valores son idénticos a los obtenidos por Gómez *et al.* (2006) para todo el noroeste de la provincia. En términos de ondulaciones geoidales, esto representa un error importante teniendo en cuenta que se trata de una región llana. Esta diferencia puede deberse al truncamiento en la serie de coeficientes del modelo geopotencial global (error de omisión) o a deficiencias en la determinación de los coeficientes armónicos que constituyen el modelo (error de comisión) (Jekely, 2009).

II.2. Ajuste por puntos de nivelación.— La diferencia entre modelo y observación no es una constante para toda la región por lo que se generó la grilla de correcciones mostrada en la Figura 3. En ella se dibujan las isolíneas cada 10 cm junto con los sitios que dieron lugar a la doble información (GPS y nivelación). Se presentan además, los valores de corrección de elevación expresadas por la distribución de las diferencias Negm96 - Nobs con los puntos de nivelación

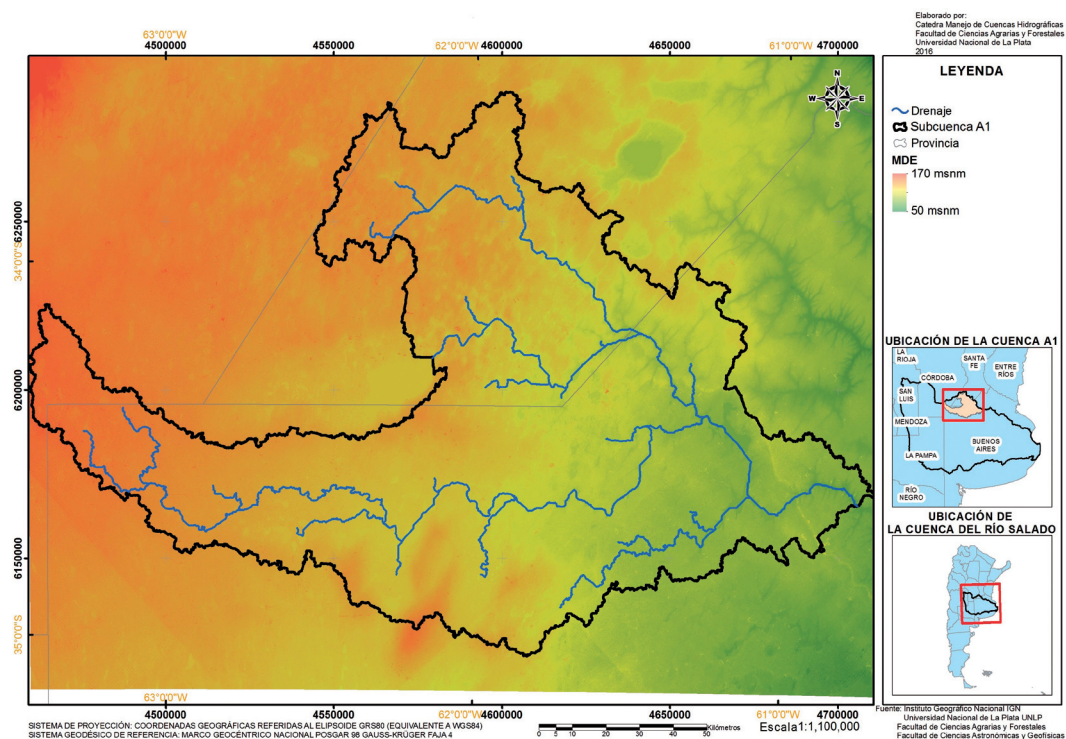


Figura 2.2. Modelo digital de elevación y sistema de drenaje de la subregión A1.

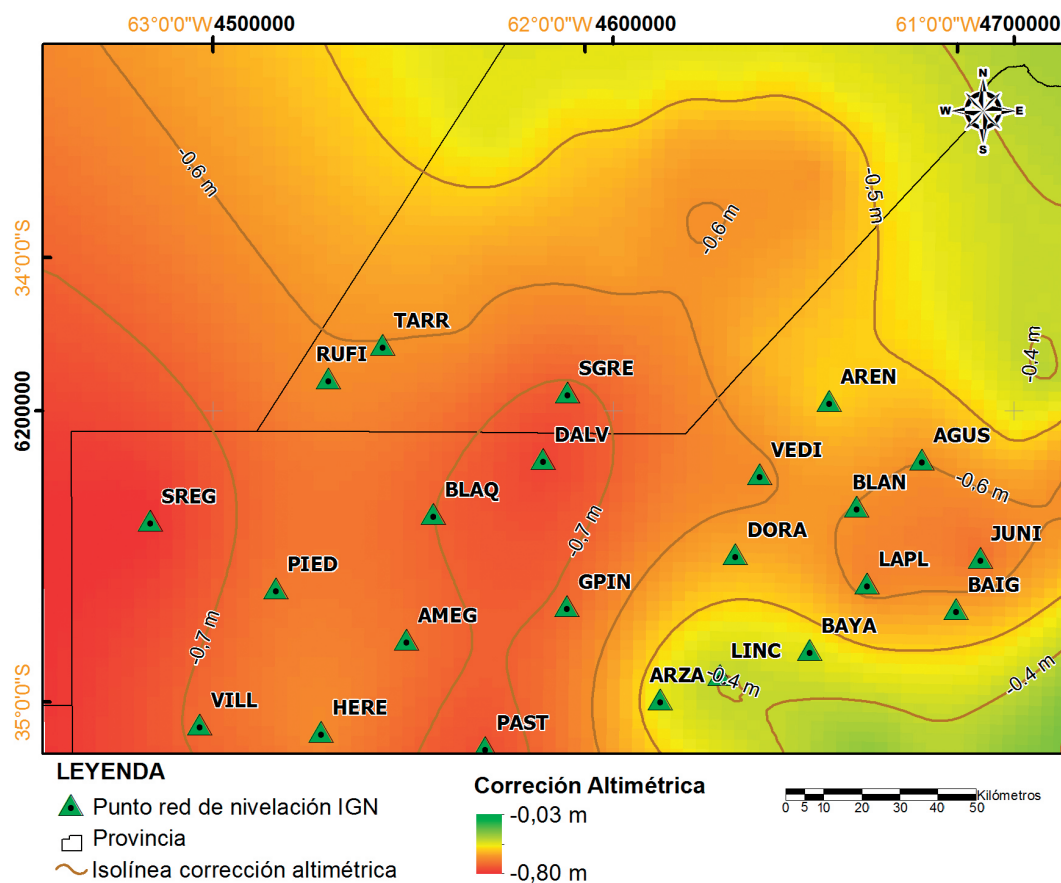


Figura 3. Distribución de las diferencias Negm96-Nobs con los puntos de nivelación IGN.

IGN. Estas diferencias dieron lugar al SRT-Mc, de acuerdo con la metodología descripta anteriormente.

Una nueva estadística de las diferencias entre la altura del SRTMc y las originales, permitió apreciar la importancia de la corrección. Esta nueva comparación arroja un desvío estándar de 1,39 m y un valor medio de 0,07 m sobre los mismos puntos que se consideraron originalmente.

Por otra parte, estas comparaciones han sido realizadas sobre puntos de nivelación, los cuales se encuentran cerca de caminos por lo que su altura no siempre representa por completo al terreno circundante. Otros estudios realizados (Perdomo, 2016 com. pers.) sobre puntos ubicados en zonas más representativas del terreno, indican que el desvío estándar puede mejorar aún más e incluso estar por debajo del metro.

Tabla 1. Superficie de ocupación del área de estudio.

	Área (km ²)	Porcentaje de ocupación Provincial		
		Santa Fe	Córdoba	Buenos Aires
A1 PMRS	12427,81	0	0	100,00
A1 corregida	17742,85	29,35	3,19	67,46
Diferencia	5315,04			

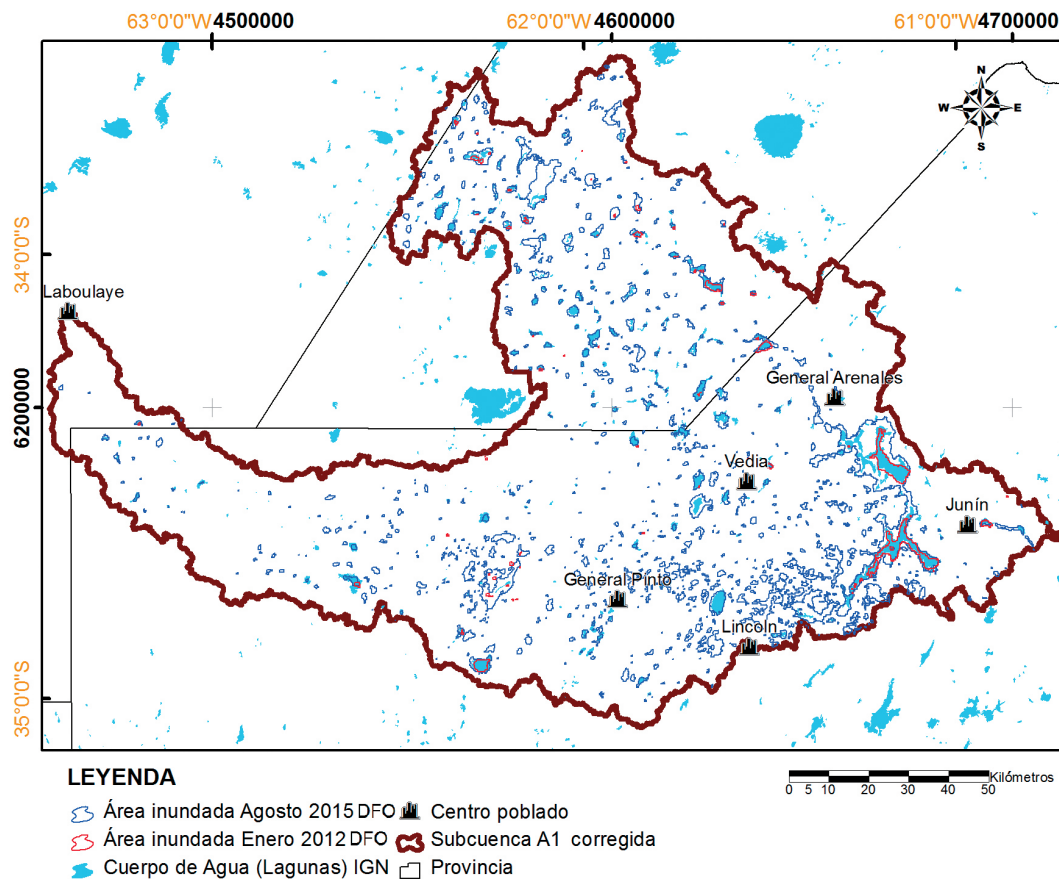


Figura 4. Distribución temporal de lagunas en la subcuenca A1.

III. COMPROBACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE CON SRTMC

A partir del SRTMc y con el procesamiento geoespacial con Arc Hydro se identificó el patrón de drenaje superficial y sus derivados en el área en estudio, los cuales permitieron rectificar la subcuenca hidrográfica A1 y la generación de redes de flujo. En la Tabla 1 se presenta la superficie de ocupación de la subregión A1 según el PMRS y luego de su rectificación denominada A1 corregida, la cual alcanzó un porcentaje de cambio positivo en la superficie de ocupación de un 30%, como se visualiza en la Figura 4.

En la Tabla 2 se expone la superficie de ocupación de la subcuenca A1 corregida y de los cuerpos de agua de tipo laguna (permanente y no permanente), a nivel de límites provinciales definidos por el IGN en SIG250.

Se identifica que el 2,8% de la superficie de estudio está ocupada por cuerpos de agua tipo laguna siendo en su mayoría de régimen no permanente.

IV. INTEGRACIÓN INFORMACIÓN DE INUNDACIONES

El análisis de cuerpos de agua realizado con las imágenes del DFO se presenta en la Figura 4 para la subcuenca A1 corregida, donde se observan tres límites: uno el generado por IGN como capa vectorial de lagunas permanentes (polígonos color cyan) y otras dos capas obtenidas del procesamiento de las imágenes de DFO en distintas fechas. Estas últimas representan sequía e inundación, considerando el análisis climático en el cual se definieron como objetivos dos límites extremos: época seca con estrés hídrico (en el

Tabla 2. Superficie de ocupación de la subcuenca A1 corregida y de los cuerpos de agua por provincia.

	Cuerpo de Agua (Laguna)			
	Total	Total	Permanente	No Permanente
	Superficie (km ²)			
Buenos Aires	11969,14	325,65	143,54	182,12
Córdoba	566,75	2,13	0,02	2,11
Santa Fe	5206,96	169,77	54,18	115,60
Total	17742,85	497,55	197,73	299,82
	Superficie en porcentaje de ocupación (%)			
Buenos Aires	67,46	1,84	0,81	1,03
Córdoba	3,19	0,01	0,00	0,01
Santa Fe	29,35	0,96	0,31	0,65
Total	100,00	2,80	1,11	1,69

Tabla 3. Superficie de ocupación de las áreas de inundación en la subcuenca A1 corregida, según DFO.

Inundación	Fecha	Superficie (km ²)	% inundación
Mínima	Enero 2012	127,58	0,72%
Máxima	Agosto 2015	1306,27	7,36%
Media	Diciembre 2012	1188,39	6,70%

Tabla 4. Superficie de ocupación de bañados en la subcuenca A1 corregida.

	Subcuenca A1 corregida		
	Cuerpo de Agua (Bañados)		
	Total	Permanente	No Permanente
	Superficie (km ²)		
Buenos Aires	836,33	1,57	834,76
Córdoba	18,70	17,78	0,93
Santa Fe	428,02	0,00	428,02
Total	1283,05	19,35	1263,70
	Superficie en porcentaje de ocupación (%)		
Buenos Aires	4,71	0,01	4,70
Córdoba	0,11	0,10	0,01
Santa Fe	2,41	0,00	2,41
Total	7,23	0,11	7,12

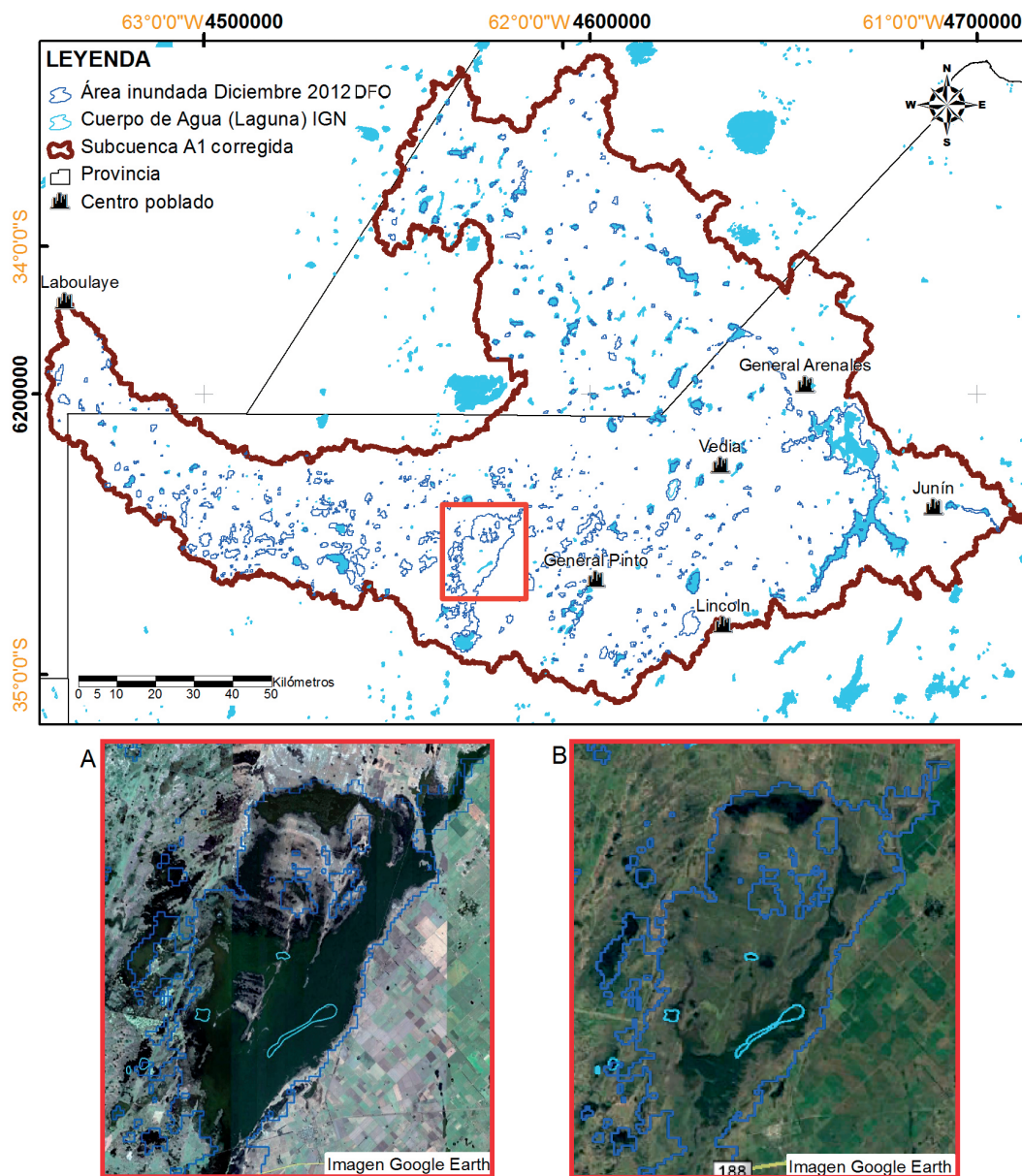


Figura 5. Distribución y ocupación espacio-temporal de lagunas en la subcuenca A1, según Tabla 3.

mes de Enero de 2012, línea color rojo) y época con excesos hídricos (Agosto de 2015, línea color azul).

Las situaciones hidrológicas de la Figura 4, que caracterizaron la subcuenca A1 corregida según los estadios hidrológicos considerados, se representan en la Tabla 3, donde se expone la superficie de ocupación definida según el procesamiento de imágenes de DFO.

En la Figura 5 se presenta el detalle de un área en la subcuenca A1 corregida, al oeste de la localidad de General Pinto, donde se realizó una observación particular identificando la superficie de ocupación de la laguna La Salada, según IGN y comparándola en dos momentos extremos de inundación (A) y sequía (B).

En la Figura 5 se identificó que, según la cartografía elaborada (DFO) y la antecedente (de IGN), existe un amplio rango de tamaños lacunares dependiendo del momento de muestreo. Considerando de fondo a las imágenes satelitales por fecha de muestreo, obtenidas de Google Earth ©, la laguna La Salada expresa una leve coincidencia en los límites de inundación con los datos del mes de diciembre de 2012 (línea azul) del DFO.

En la Tabla 4 se presenta la superficie de ocupación por provincia de los bañados en la subcuenca A1 corregida definidos por el IGN (en SIG250). En la misma se identifica que el 7,23% de la subcuenca es ocupada por bañados, de los cuales el 0,11 % presenta régimen permanente. Según la DFO estos bañados han modificado temporalmente sus dimensiones en función de la dinámica hídrica.

CONCLUSIONES

La definición de un sistema de drenaje superficial en una cuenca de llanura a partir del SRTM90 ajustado geodésicamente es una metodología adecuada a la que se ajusta la dinámica hídrica local, en base a esa resolución espacial. Estas correcciones altimétricas no son constantes en la región en estudio, y los resultados alcanzados permitieron mejorar la estadística de las diferencias entre las alturas observadas y las del SRTM90 y así regenerar la morfometría de la subcuenca A1 y del sistema de drenaje superficial.

Se observó que a medida que se detallan las características topográficas de una zona, con correcciones geodésicas con datos de campo, es posible delimitar con mayor precisión a una cuenca hidrográfica junto con su sistema de drenaje superficial. Es importante recalcar que, en estudios hidrológicos es de vital importancia que toda la información digital tenga la misma resolución espacial. A mayor precisión o escala que se tenga en la información base, mayor será la exactitud de la información generada a partir de los mismos.

El análisis multitemporal de cuerpos de agua con DFO, provenientes de distin-

tas fuentes de información oficial, permitió identificar la dinámica de ocupación hídrica superficial de la zona y evaluar su comportamiento en periodos de estiaje o inundación. El mismo aporta información útil a la toma de decisiones para prevenir o mitigar alertas provenientes de los cuerpos de aguas en una zona de llanura, con características homólogas o similares en su extensión, en especial en lugares con proximidad a zonas pobladas o agropecuarias.

Se reconoce que la utilización de herramientas SIG facilita la manipulación de la información, permitiendo almacenar grandes volúmenes de datos para así compararlos y generar información con mayor precisión. Esta base de datos contribuye a la precisión para el cálculo de los parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica, ajustándose a la realidad de la zona de estudio.

La teledetección en este caso, ha propiciado al trabajo de equipos multidisciplinarios que resultan indispensables en la ejecución de proyectos hidroambientales.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se enmarca en un proyecto denominado Sistema Soporte de las Decisiones frente a eventos extremos para la gestión de la Cuenca Alta del Río Salado de la Provincia de Buenos Aires. Estudio de Impacto Ambiental y Social (EIAyS), financiado por el Fondo de Innovación Tecnológica Sectorial de Medio Ambiente y Cambio Climático (FONARSEC) del MINCyT, de la Convocatoria 2013. ANPCyT. 2015 -2016.

Los análisis de las precipitaciones fueron realizados con datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (Expediente N° 154.213/2016).

REFERENCIAS

- Arozarena, A., Calero, E., Delgado, J. y Vivas, P. 1989. Aplicaciones de las imágenes espaciales a la cartografía de base. En: R. Núñez de las Cuevas y F. Fourneau (eds.), Coloquio Hispano-Francés sobre Teledetección y Planificación Integrada del Territorio: 215-223. Madrid.

- CGIAR-CSI. 2004. SRTM 90m Digital Elevation Data. <http://srtm.csi.cgiar.org/>. Accedido el 1/12/2015.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia, 575 pp.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia, Barcelona, España, 586 pp.
- DFO, 1993. The Dartmouth Flood Observatory for Humanitarian, Water Resources and Research Applications. <http://floodobservatory.colorado.edu/dfomission.pdf>. Accedido el 1/12/2015.
- Díaz, G., Mohr-bell D. y Lencinas J. D. 2010. Modelos digitales de elevación de alta resolución. Extracción con datos del satélite ALOS. Notas Patagonia Forestal: 5-8. Esquel, Argentina
- ESRI. 2011. Arc Hydro Tools - Tutorial Version 2.0. 189 pp. <http://downloads.esri.com/archydro/archydro/Tutorial/Doc/Arc%20Hydro%20Tools%202.0%20-%20Tutorial.pdf>. Accedido el 1/3/2016.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. y Alsdorf, D. 2007. The Shuttle Radar Topography Mision. https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf. Accedido 1/12/2015.
- Galván, L. 2012. 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 maestría Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, 90 pp. La Plata, Argentina.
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. y Besteiro S. 2009. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Primera Edición. La Plata, 321 pp.
- Gómez, M. E., Perdomo R. y Del Cogliano, D. 2006. Modelo de geoide en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires. GEO-ACTA 31:101-107.
- Heiskanen, W. y Moritz, H. 1967. Physical Geodesy. Freeman, San Francisco y Londres, 364 pp.
- Henaos, J. E. 1988. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada, Bogotá, Colombia: 396 pp.
- IDERA. 2007. http://www.idera.gob.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=335:geoservicios&catid=33:servicios&Itemid=169. Accedido el 1/12/2015.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). 2009. Disposición marco POSGAR 07 No.20/2009. http://ramdac.ign.gob.ar/posgar07_pg_web/documentos/Disposicion_Marco_POSGAR_07.pdf. Accedido 1/12/2015.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). 2013. Base de datos geográfica. Límites políticos administrativos y centros poblacionales. <http://www.ign.gob.ar/sig>. Accedido el 1/12/2015.
- Jekely, C. 2009. Omission Error, Data Requirements, and the Fractal Dimension of the Geoid. VII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy. Proceedings of the Symposium in Rome 137: 181-187.
- Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B., Torrence, M. H., Wang, Y. M., Williamson, R. G., Pavlis, E. C., Rapp, R. H. y Olson, T. R. 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, 586 pp.
- MOSP. 1999. Plan Maestro del Río Salado (PMRS) <http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/plan-maestro.php>. Accedido el 1/3/2016.
- 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. DNDA: 5048761-UNLP. <http://geoweb.fcaglp.unlp.edu.ar/tdaGEOBA/>. Accedido el 1/7/2016.
- Rodríguez, 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, Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 143 pp.
- Rodríguez, E., Morris, C. S. y Belz, J. E. 2006. A global assessment of the SRTM performance. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 72 (3): 249-260.