

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO MIRANDA (ARGENTINA) A PARTIR DE DIFERENTES MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

Sánchez Caro L.^{a,b}, Alfaro D.N.^c y López L.^{a,d}

^aConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA

^bCentro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA

^cFacultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM), Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA

^dInstituto de Recursos Minerales (INREMI), FCNyM - Universidad Nacional de La Plata, La Plata, BA, ARGENTINA

e-mail: leonardo.sanchezcaro@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue comparar el rendimiento de tres modelos digitales de elevación (MDE; base de datos SRTM, ASTER GDEM y MDEAr), para el análisis morfométrico de la cuenca del Río Miranda, La Rioja, Argentina. Para esto, los MDE originales, con una resolución espacial de 30 m, fueron remuestreados a un tamaño de píxel de 10, 90 y 120 m. Se generaron cuencas y redes de drenaje con áreas mínimas de aporte de 0,1 y 0,2 km². A modo de referencia, se digitalizó manualmente la red de drenaje a una escala de 1:10000. Se midieron y calcularon 26 parámetros referidos a la geometría de cuenca, a la red de drenaje y al relieve. Mediante digitalización manual, se obtuvo una red de sexto orden, con un total 1669 cursos. Para un área mínima de 0,1 km² todos los MDE resultaron en redes de sexto orden. Para un área mínima de 0,2 km², se obtuvieron redes de quinto o sexto orden, según el MDE y tamaño de píxel. En este sentido, SRTM y ASTER demostraron mayor consistencia en los resultados. La pendiente media de la cuenca se vio afectada por el tamaño de píxel, mientras que las curvas hipsométricas obtenidas para cada MDE fueron muy semejantes, independientemente del resmuestreo. Para todas las bases de datos, el remuestreo a resoluciones más gruesas aumentó considerablemente el error en la definición de la red de drenaje, mientras que el remuestreo a mayor resolución sólo significó una disminución significativa del error para el MDE SRTM. Se recomienda la utilización de los MDE ASTER de 30 m y SRTM remuestreado a 10 m para el análisis del drenaje en la zona de estudio. Para el análisis del relieve y la geometría de cuenca, no hay diferencias significativas entre los tres MDE originales.

Palabras Clave: Cuencas de Drenaje, Sistemas de Información Geográfica, Geomorfología.

INTRODUCCIÓN

El análisis morfométrico es una herramienta frecuentemente utilizada para abordar la hidrología y geomorfología de una zona. Desde finales del Siglo XX, los modelos digitales de elevación (MDE) han sido ampliamente utilizados en este tipo de estudios. El análisis morfométrico representa el primer paso del estudio geomorfológico cuantitativo de una cuenca hidrográfica (Das et al, 2016), y constituye la base para

evaluar controles estructurales y litológicos que puedan estar actuando en un paisaje (Ferraris, 2012).

Actualmente existen abundantes fuentes de datos de elevación de uso libre (Grohmann, 2015). La calidad de los datos de entrada condiciona los resultados obtenidos a través de los procedimientos implicados en un análisis morfométrico. Mayor resolución espacial de un MDE implica mayor precisión, pero conlleva también un mayor gasto computacional en su procesamiento (Grohmann, 2015). Numerosos autores han evaluado el efecto de la resolución de los MDE sobre diferentes parámetros morfométricos de una cuenca, analizados a distintas escalas mediante el remuestreo de los datos de elevación (Chen and Zhou, 2013; Chow and Hodgson, 2009; Gao, 1997; Mokarram and Hojati, 2017). Para el estudio geomorfológico y/o hidrológico de una zona, resulta de interés saber cuál de las fuentes de datos disponibles es la más apropiada, de acuerdo a características propias del área de estudio (cobertura del suelo, relieve, entre otros) y a los objetivos de la investigación (Das et al, 2016; Karabulut and Özdemir, 2019; Niyazi et al, 2019).

Los objetivos del presente trabajo fueron realizar una caracterización geomorfométrica preliminar de la Cuenca del Río Miranda, La Rioja, Argentina, evaluar el desempeño de MDE de distintas fuentes para este fin, y determinar la influencia del remuestreo de los MDE sobre los parámetros morfométricos básicos del análisis.

Área de estudio

La Cuenca del Río Miranda (ver Fig. 1) se ubica en el centro de la provincia de La Rioja, sector centro-occidental argentino, entre los 29° 02' 37'' y 29° 27' 01'' de latitud sur, y entre los 67° 52' 16'' y 67° 37' 40'' de longitud oeste. Presenta una orientación NNO-SSE y su punto de desembocadura se localiza a aproximadamente 4 km al SO de la ciudad de Sañogasta, departamento de Chilecito. La cuenca se desarrolla sobre el sector centro-sur de las sierras de Famatina y limita hacia el sur con las sierras de Sañogasta, con una elevación máxima de 5749 msnm y una elevación mínima de 1294 msnm. Con cabecera en el Cerro General Belgrano, su superficie engloba diversos rasgos orográficos de pequeña escala tales como el Cerro Morado, el Cerro Potrerillos, el Cerro Alto Blanco, entre otros.

Las sierras de Famatina pertenecen a la unidad morfoestructural del Sistema de Famatina, el cual tuvo su evolución tectono-metamórfica y magmática durante el ciclo Famatiniano (465 a 365 Ma.). Los afloramientos de este Sistema se extienden a lo largo de una faja norte-sur entre los 27° 25' a 30° 20' de latitud sur, con 350 km de largo y 60 km de ancho, rodeada hacia el este y oeste por las Sierras Pampeanas (Duran et al, 1987). Las sierras de Famatina constituyen un sector geológicamente complejo, con la presencia de corrimientos de alto ángulo controlados por la estructuración del basamento. El levantamiento de estas sierras es atribuido a fallas inversas relacionadas con la Orogenia Andina durante el Triásico Tardío (Candiani et al, 2011).

Desde un punto de vista litoestratigráfico, El Sistema de Famatina está conformado por rocas metamórficas de bajo grado y plutonitas del Precámbrico superior-Paleozoico inferior sobre las cuales apoyan sedimentitas marinas y continentales, y vulcanitas paleozoicas, mezozoicas y cenozoicas (Miró, 1999). La mayor parte de la Cuenca del Río Miranda muestra afloramientos del Granito Ñuñorco (Turner, 1962), el cual constituye el basamento en este sector. Se reconocen también las sedimentitas continentales pérmicas de la Fm Patquía, así como depósitos del Cenozoico superior relacionados al piedemonte y sedimentos modernos del Río Miranda.



Figura 1. Ubicación del área de estudio.

METODOLOGÍA

Se descargaron tres MDE disponibles online en forma gratuita, desde las páginas web de sus organismos proveedores correspondientes. De la plataforma EarthExplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>) se obtuvo el MDE correspondiente a la misión espacial SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), llevada cabo en el año 2000 por la la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en cooperación con el Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), la Agenzia Spaziale Italiana (ASI) y el National Geospatial Intelligence Agency (NGA)(Farr et al., 2007). Del centro de búsqueda Earth Data Search (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) de la NASA, se obtuvo el MDE Global Digital Elevation Model, correspondiente al sensor de Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer del satélite Terra (ASTER). De la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la Argentina (<https://www.ign.gob.ar/>) se obtuvo el MDE-Ar v2.0, generado en el IGN a partir de una combinación de datos de las misiones satelitales SRTM y ALOS. Su referencia vertical coincide con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16).

Los tres MDE presentan una resolución espacial de 1 arco-segundo (aprox. 30 m en el ecuador), y un Sistema de Coordenadas Geográficas WGS84. Para el procesamiento de los MDE, se los integró al sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS 10.2.2. Los MDE originales fueron proyectados desde el sistema de coordenadas geográficas original, al sistema de coordenadas proyectadas Universal Transversal de Mercator faja 19 sur, con datum WGS84.

Cada MDE fue remuestreado para obtener grillas de menor resolución (90 y 120 m de píxel) y de mayor resolución (10 m de píxel) (ver Fig. 2). En todos los casos, se utilizó un algoritmo bilineal (herramienta Resample, en el módulo Data Management Tools de ArcToolBox) para interpolar los datos reales, y generar las correspondientes matrices derivadas.

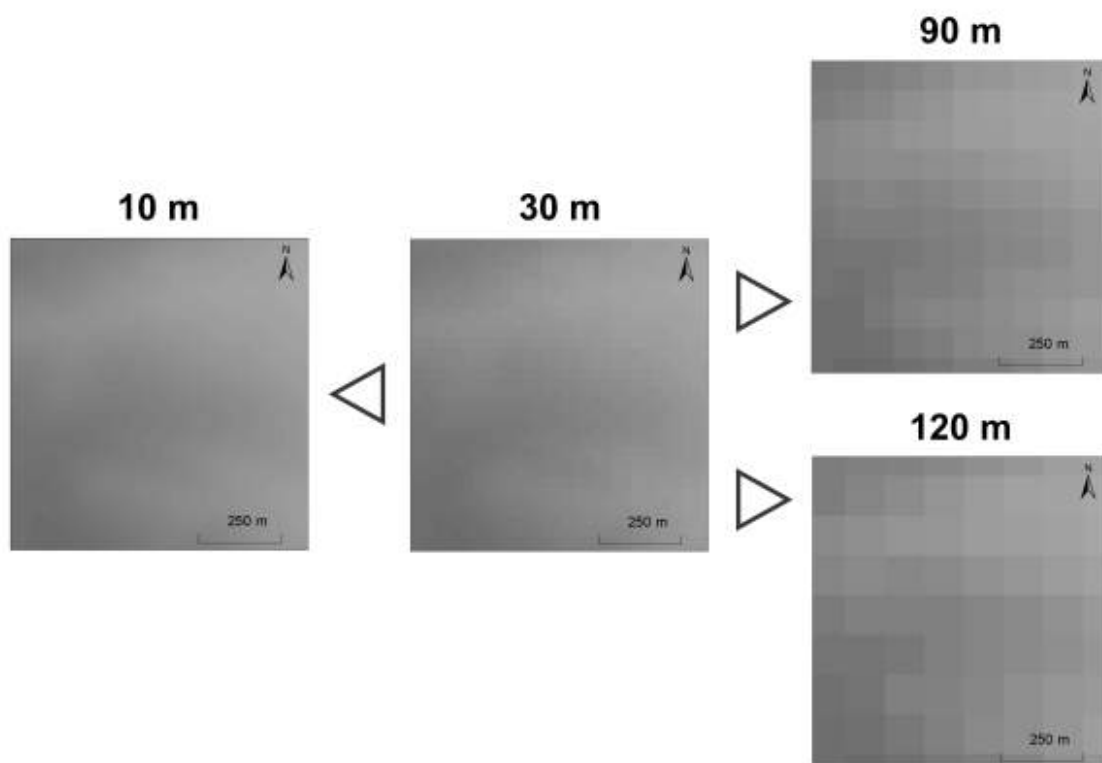


Figura 2. MDE de mayor y menor tamaño de celda obtenidos a partir del MDE original con píxel de 30 m (en este caso, corresponde al MDE SRTM).

Se delimitaron las cuencas y se generaron las redes de drenaje mediante el paquete de herramientas Hydrology (ArcGis 10.2.2). La digitalización automática de una red de drenaje implica una serie de pasos sucesivos, cada uno de los cuales resulta en la generación de una nueva capa ráster. El proceso se inicia con el relleno de las depresiones e imperfecciones de los datos originales. Sobre el MDE corregido, se calcula la dirección de flujo correspondiente a cada píxel; en este caso, se implementó el modelo D8 (O'Callaghan and Mark, 1984) de acuerdo a Jenson and Domingue, 1988. A partir de esto, se calcula la acumulación de flujo para cada píxel, y se extrae la red de drenaje mediante la aplicación de un área crítica de aporte. Si bien ha habido intentos de generar un criterio cuantitativo a la definición de esta área crítica (e.g. Tarboton et al, 1991), típicamente su definición sigue siendo subjetiva. Dobos and Daroussin, 2005,

plantean que, para un MDE con tamaño de píxel de 100 m, un área crítica de 1 km² resulta en una densidad de drenaje realista. En este caso, y con la intención de obtener el mayor detalle posible de acuerdo a las limitaciones propias de los sets de datos de elevación, se utilizaron 2 áreas críticas, 0,1 km² y 0,2 km².

Se calcularon 24 parámetros morfométricos referidos a la geometría de la cuenca, al relieve, y a la red y textura de drenaje (ver Tabla I). Se generó también la curva hipsométrica correspondiente a cada MDE.

Tabla I. Parámetros morfométricos medidos y calculados.

Parámetro	Símbolo	Método
Red de drenaje		
Orden	u	<i>Strahler (1964)</i>
Número de cursos	Nu	$Nu = N1 + N2 + \dots + Nn$
Longitud total de cursos (km)	Lu	$Lu = L1 + L2 + \dots + Ln$
Relación de bifurcación	Rb	$Rb = Nu/Nu+1$
Promedio ponderado de relación de bifurcación	RbP	$RbP = \frac{\sum_{i=1}^n Rb_i (N_i + N_{i+1})}{\sum_{i=1}^n (N_i + N_{i+1})}$
Longitud del canal principal	LCP	<i>Análisis en SIG</i>
Geometría de cuenca		
Área (km ²)	Ac	<i>Análisis en SIG</i>
Longitud (km)	Lc	<i>Análisis en SIG</i>
Perímetro (km)	Pc	<i>Análisis en SIG</i>
Ancho (km)	Wc	$Wc = Ac/Lc$
Coefficiente de circularidad	Kci	$Kci = 4\pi Ac/Pc^2$
Coefficiente de elongación	Ke	$Ke = 2\sqrt{Ac/\pi}/Lc$
Coefficiente de textura	Kt	$Kt = Nu/Pc$
Factor de forma de Horton	Kf	$Kf = Ac/Lc^2$
Coefficiente de compacidad	Kc	$Kc = Pc/2\sqrt{\pi Ac}$
Textura de drenaje		
Frecuencia de cursos	Fr	$Fr = Nu/Ac$
Densidad de drenaje	Dd	$Dd = Lu/Ac$
Características del relieve		
Elevación máxima	H _{MAX}	<i>Análisis en SIG</i>
Elevación mínima	H _{MIN}	<i>Análisis en SIG</i>
Relieve	Rf	$Rf = H_{MAX} - H_{MIN}$
Elevación media	Hm	<i>Análisis en SIG</i>
Coefficiente de relieve	Kr	$Kr = Rf*100/Lc$
Pendiente media de cuenca	Sm	<i>Análisis en SIG</i>
Número de rugosidad	Nr	$Nr = Rf*Dd$

Para evaluar y analizar comparativamente los resultados, se utilizaron los valores en bruto de cada parámetro para los diferentes MDE, y valores promedio y de variación porcentual para cada parámetro. La variación porcentual se define como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo, sobre el valor máximo de cada parámetro.

Se realizó la digitalización manual de la red de drenaje, a una escala de 1:10000, con el objetivo de contar con una referencia supervisada contra la cual contrastar las redes obtenidas automáticamente.

Se evaluó el grado de error de las redes automatizadas respecto de la digitalizada manualmente, en base al Nu obtenido para cada una de ellas. La red generada con un área crítica de 0,1 km² presentó un error menor, por lo que se definió como patrón para evaluar el desempeño de los MDE. Esto se realizó sobre la base del número de cursos de orden 1, 2, 3 y 4 respecto de la red manual. Dado que ambas redes presentaron dos cursos de quinto orden y uno de sexto orden, estos órdenes fueron excluidos del análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron 12 conjuntos de cuencas de drenaje con sus respectivas redes (ver ejemplo en Fig. 3) y parámetros morfométricos. Se muestran a continuación los resultados obtenidos para los parámetros de geometría de cuenca, relieve y red de drenaje (se incluye dentro de estos últimos a los referidos a la textura de drenaje).

Geometría de cuenca

No todos los parámetros son afectados de igual manera por el remuestreo (ver Tabla II). Una mayor variación porcentual se interpreta como una mayor influencia del remuestreo de los MDE sobre el valor de un parámetro morfométrico dado.

Se obtuvo un Ac promedio de 415 km², con una variación porcentual prácticamente nula. El Pc promedio fue de 134 km, con una mayor variación que el área. Los MDE de menor tamaño de píxel presentan los mayores valores de Pc, dado que la mayor resolución aumenta la distancia lineal que recorre el borde de la cuenca, mientras que el área prácticamente no se ve afectada. Los valores bajos de Kci, Ke y Kf son congruentes entre sí e indican una cuenca alargada; sin embargo, Kci presenta una variación porcentual mucho mayor a la de Ke y Kf, debido a que su cálculo involucra el Pc. Esto ejemplifica la importancia de caracterizar la geometría de una cuenca mediante la integración de varios parámetros. Kc también presenta cierta variación debida al Pc, aunque en todos los casos se mantiene en el rango de valores asignado a una cuenca oval oblonga a rectangular-oblonga (Clase III, Campos, 1992). Si bien el remuestreo de los MDE influye sobre los resultados obtenidos dentro de cada set de datos, los MDE SRTM, ASTER y MDE Ar no muestran diferencias significativas entre sí respecto de la geometría de cuenca.

Tabla II. Parámetros morfométricos referidos a la geometría de cuenca.

Parámetro	Promedio	Mínimo	Máximo	Variación %
Ac (km ²)	415	413	418	1,20%
Lc (km)	48	48	49	2,85%
Pc (km)	134	127	143	11,19%
Wc (km)	8,6	8,5	8,7	3,08%
Kci	0,293	0,254	0,323	21,32%
Ke	0,5	0,5	0,5	2,96%
Kt	8,8	8,1	9,5	15,08%
Kf	0,2	0,2	0,2	5,84%
Kc	1,8	1,7	2,0	11,30%

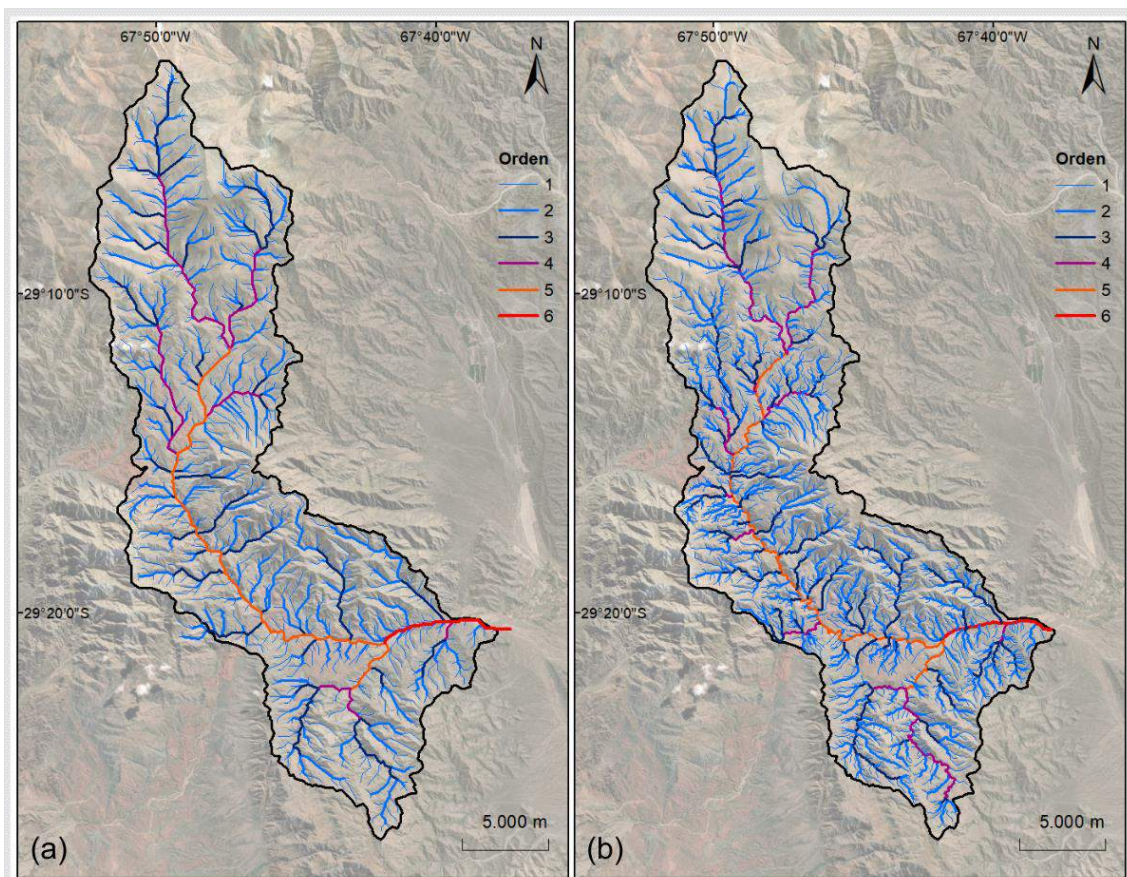


Figura 3. Cuenca y red de drenaje jerarquizada (a modo de ejemplo, se muestran los resultados correspondientes al MDE SRTM con tamaño de píxel de 10 m), obtenidas mediante la aplicación de herramientas de SIG. **b.** Red de drenaje digitalizada manualmente.

Relieve

Los parámetros de relieve son particularmente consistentes entre distintos MDE con y sin remuestreo (ver Tabla III), con excepción de S_m , que puede tomarse como un indicador general de las pendientes. El aumento del tamaño de píxel tiende a suavizar las pendientes, lo cual debe ser tenido en cuenta a la hora de realizar estudios regionales con MDE de menor resolución espacial.

La curva hipsométrica de una cuenca otorga una aproximación al estado evolutivo de la misma (Strahler 1952). La Fig. 4 muestra la curva hipsométrica de la Cuenca del Río Miranda, que resultó uniforme a través de los diferentes MDE. De acuerdo a la comparación con curvas teóricas que simbolizan estadios de juventud, madurez y senectud de la cuenca, la Cuenca del Río Miranda se encontraría en un estado intermedio entre madurez y senectud.

Tabla III. Parámetros morfométricos referidos al relieve

Parámetro	Promedio	Mínimo	Máximo	Variación %
Hmax (msnm)	5741	5730	5749	0,33%
Hmin (msnm)	1285	1266	1294	2,16%
Rf (m)	4456	4441	4471	0,67%

Hm (msnm)	2973	2967	2977	0,34%
Kr	0,092	0,091	0,093	2,42%
Sm (grados)	23	20	25	19,58%
Nr	9,01	8,75	9,14	4,31%

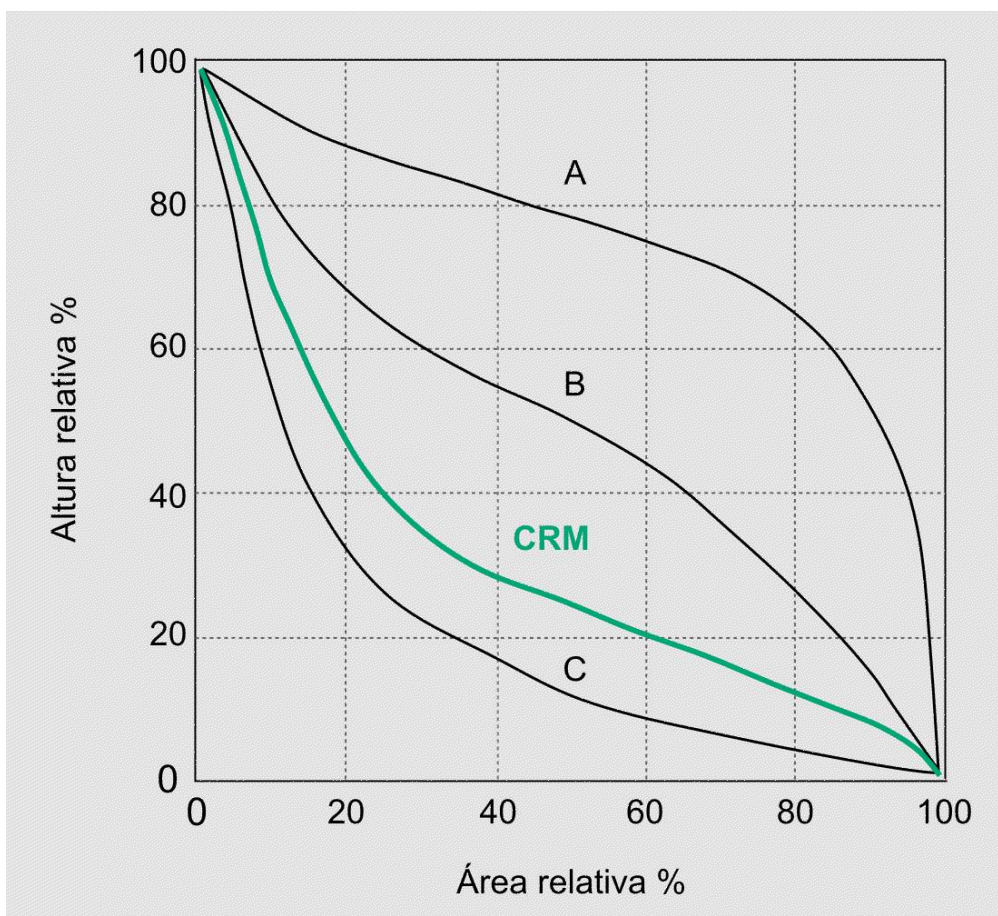


Figura 4. Curva hipsométrica de la Cuenca del Río Miranda (CRM) y curvas teóricas que representan estadios de juventud (A), madurez (B) y senectud (C) de una cuenca hidrográfica.

Red de drenaje

Al evaluar los resultados referidos a la red de drenaje, debe tenerse en cuenta al área crítica como una variable adicional que condiciona el rendimiento de los MDE. La red digitalizada manualmente resultó de sexto orden, contiene 1669 cursos que suman una longitud total de 1096 km, y presentó un RbP de 4,34. Se usó como referencia para evaluar el desempeño de los distintos MDE, así como del remuestreo y de la aplicación de distintas áreas críticas.

Para el área crítica de 0,1 km², todas las redes automáticas fueron de sexto orden. Con un área crítica de 0,2 km², el remuestreo condiciona el orden de la red, que resultó de orden 5 o 6, según el caso. La fuente de datos con peor desempeño para un área crítica de 0,2 km² fue MDE Ar, donde sólo la grilla remuestreada a 90 m resultó en un orden 6. En el caso de SRTM y ASTER, se obtuvieron dos redes de orden 5 y dos de orden 6.

La Fig. 5 muestra el error porcentual en Nu de cada MDE respecto de la red manual para ambas áreas de aporte. Resulta evidente que el área crítica de 0,1 km² presenta

errores significativamente menores que la de 0,2 km². Esto, sumado a la inconsistencia de la última respecto del orden de cuenca, permite definir 0,1 km² como el área mínima de aporte que mejor se representa el paisaje real.

Tabla IV. Parámetros morfométricos referidos al drenaje

Parámetro	Área límite = 0,1 km ²				Área límite = 0,2 km ²			
	Promedio	Mínimo	Máximo	Variación %	Promedio	Mínimo	Máximo	Variación %
Nu	1184	1031	1309	21,24%	610	566	661	14,37%
N1	912	807	1013	20,34%	478	444	509	12,77%
N2	208	172	235	26,81%	105	95	118	19,49%
N3	49	41	58	29,31%	22	18	26	30,77%
N4	8	7	12	41,67%	4	3	6	50,00%
N5	2	2	2	0,00%	1	1	2	50,00%
N6	1	1	1	0,00%	1	1	1	0,00%
Lu (km)	840	816	859	5,01%	627	607	647	6,20%
Rb1-2	4	4	5	14,85%	5	4	5	11,83%
Rb2-3	4	4	4	12,21%	5	4	5	19,47%
Rb3-4	6	5	7	30,91%	5	4	7	46,00%
Rb4-5	4	4	6	41,67%	3	2	5	60,00%
Rb5-6	2	2	2	0,00%	2	2	2	0,00%
RbP	4	4	5	10,88%	5	4	5	9,04%
Fr	3	2	3	21,43%	1	1	2	14,58%
Dd	2	2	2	4,32%	2	1	2	5,77%

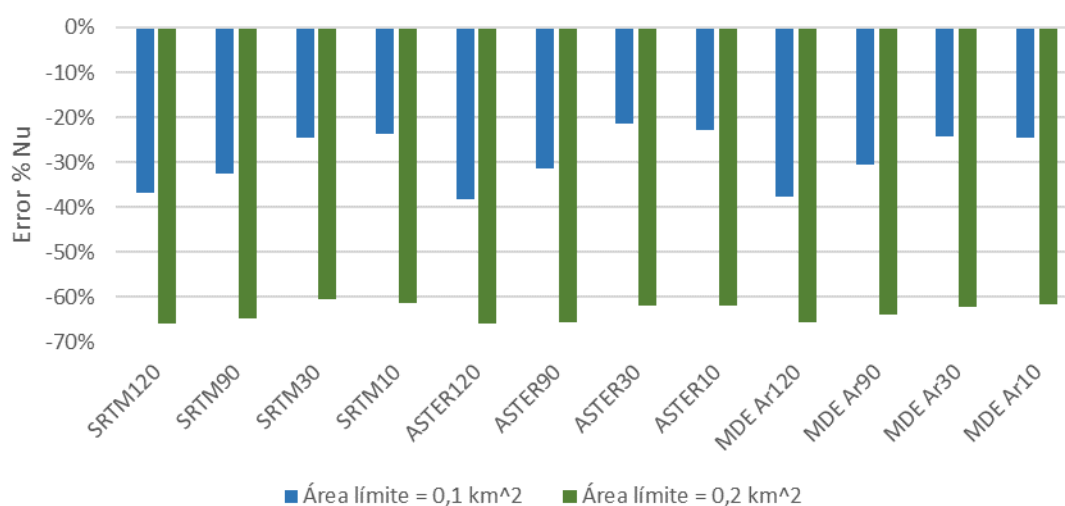


Figura 5. Error porcentual en el número total de ríos de cada MDE, para ambas áreas críticas, respecto de la red digitalizada manualmente.

Para identificar las diferencias de rendimiento entre los MDE, se utilizó el error promedio de número de cursos de cada orden (Nn), obtenidos con un área crítica de 0,1 km², respecto de la red manual (ver Fig. 6). En todos los casos se obtuvo un curso de

sexto orden y dos cursos de quinto orden, por lo que ambos órdenes fueron excluidos del análisis. Los MDE SRTM de 10 m y ASTER de 30 m de tamaño de píxel son los que presentaron menor error promedio. Por otro lado, el MDE ASTER de 30 m es el único caso que presentó un desvío positivo, y menor error para cada Nn que el obtenido por remuestreo del MDE a 10 m de resolución.

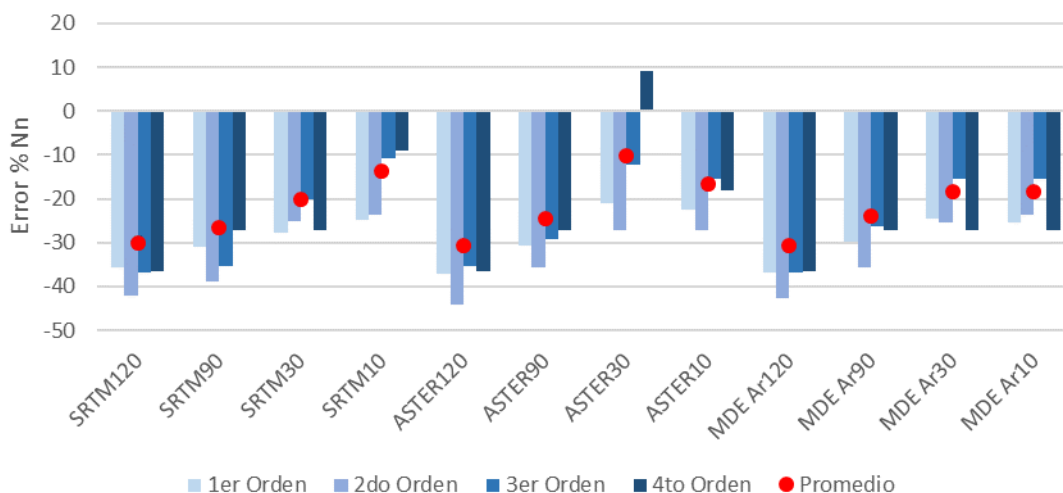


Figura 6. Error porcentual de los cursos de orden 1 a 4 y error porcentual promedio de cada MDE, para un área crítica de 0,1 km², respecto de la red manual.

CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización morfométrica de la Cuenca del Río Miranda, Provincia de La Rioja, Argentina. Se obtuvo un área de 415 km² y un perímetro de 134 km, con 48 km de largo y 8,6 km de ancho. La cuenca presenta una forma alargada y es de sexto orden.

El perímetro de la cuenca se ve afectado por el remuestreo de los MDE, lo cual conlleva variaciones en el cálculo del coeficiente de circularidad. Por esto, se recomienda integrar varios índices en la caracterización geométrica de una cuenca, especialmente en trabajos regionales a partir de datos de elevación de baja resolución espacial. De igual manera, el aumento del tamaño de píxel suaviza las pendientes del terreno, por lo que la pendiente media de la cuenca disminuye proporcionalmente a la resolución espacial del MDE.

Se verificó la importancia de definir un área crítica adecuada para la extracción de la red de drenaje a partir de los datos de elevación. El área crítica de 0,1 km² arrojó los mejores resultados, dado que se ajustó con menor error a la red de drenaje obtenida mediante el mapeo manual. Dentro de las redes obtenidas con esta área de aporte, las correspondientes a SRTM de 10 m y ASTER de 30 m presentaron el menor error porcentual promedio en el número de cursos respecto de la red manual, por lo que estos sets de datos pueden considerarse los más adecuados para la extracción de redes de drenaje en esta zona. Cabe mencionar que en el caso de SRTM, el remuestreo a menor tamaño de píxel disminuyó el error en el cálculo de la red, mientras que para los datos ASTER, los mejores resultados fueron obtenidos a partir del MDE de 30 m original.

Los resultados de este trabajo constituyen la base para futuros estudios geomorfométricos de la región, en los cuales podrán abordarse aspectos como el control

litológico y/o tectónico sobre el desarrollo de la red de drenaje, así como la aplicación de criterios geomorfológicos a la hidrología de la cuenca.

REFERENCIAS

- Candiani J.C., Astini, R., Dávila, F., Collo G., Ezpeleta, M., Alasino, P., Dahlquist, J. y Carrizo, R. *Hojas geológicas 2969-18, Famatina y 2969-24, Sañogasta, 1:100.000*, Boletín 379, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires, 2011.
- Campos A., D. F. *Procesos del ciclo hidrológico*, UASLP, San Luis Potosí, México, 1992.
- Chen, Y. and Zhou, Q. A scale-adaptive DEM for multi-scale terrain analysis, *Int J Geogr Inf Sci*, 27 (7), 1329-1348, (2013). DOI:10.1080/13658816.2012.739690
- Chow T.E., and Hodgson, M.E. Effects of lidar post-spacing and DEM resolution to mean slope estimation, *Int J Geogr Inf Sci*, 23 (10), 1277-1295, (2009) DOI: 10.1080/13658810802344127
- Das, S., Patel, P.P. and Sengupta, S. Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin–Upper Tons Basin, Indian Himalayas. *SpringerPlus* 5, 1544 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3207-0>
- Dobos E., and Daroussin, J.. *The derivation of the Potential Drainage Density Index (PDD) In. Dobos et al. 2005. An SRTM-based procedure to delineate SOTER Terrain Units on 1:1 and 1:5 million scales*. EUR 21571 EN, Office of Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 2005.
- Durand, F.R., Toselli, A.J. y Aceñolaza, F.G. Las estructuras de la Quebrada de Miranda y sus relaciones regionales, sistema de Famatina, provincia de La Rioja, Argentina. *Rev Geol de Chile*, 31, 21-29 (1987).
- Farr, T. G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission, *Geophys*, 45 (RG2004), 33 (2007). doi: 10.1029/2005RG000183.
- Ferraris, F., Firpo, M., Pazzaglia, F.J. DEM analyses and morphotectonic interpretation: The Plio Quaternary evolution of the eastern Ligurian Alps Italy. *Geomorphology* 149–150, 27–40 (2012).
- Gao, J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale, *Int J Geogr Inf Sci*, 11 (2), 199-212 (1997).
- Grohmann, C.H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Comput & Geosci*, 77, 111-117, (2015). DOI:10.1016/j.cageo.2015.02.003
- Horton, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Geol Soc Am Bull*, 56, 275-370 (1945).
- Jenson, S. and Domingue, J. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 54, 1593-1600 (1988).
- Karabulut, M.S. and Özdemir, H. Comparison of basin morphometry analyses derived from different DEMs on two drainage basins in Turkey. *Environ Earth Sci* 78, 574 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8585-5>
- Miró, R.C. *El Basamento Precámbrico-Paleozoico inferior de las Sierras Pampeanas, Famatina, Cordillera Oriental y Puna*. Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, 1999.
- Mokarram, M. and Hojati, M. Morphometric analysis of stream as one of resources for agricultural lands irrigation using high spatial resolution of digital elevation model (DEM) *Comput Electron Agr*, 142, 190–200 (2017).
- Niyazi, B., Zaidi, S. and Masoud, M. Comparative Study of Different Types of Digital Elevation Models on the Basis of Drainage Morphometric Parameters (Case Study of Wadi Fatimah Basin, KSA). *Earth Syst Environ* 3, 539–550 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00111-2>

- O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Comput Vis Graph Image Process*, 28, 328-344 (1984).
[http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Strahler, A. N. Hypsometric (area- altitude) analisis of erosional topography. *Geol Soc Am Bull*, 63, 1117-1142 (1952).
- Strahler, A.N. *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks*, Section 4-II of Handbooks of Applied Hydrology, Mc Graw-Hill Book Co, New York, USA, 1964.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L. and Rodriguez-Iturbe, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrol Process*, 5, 81-100 (1991). doi:10.1002/hyp.3360050107
- Turner, J.C. Estratigrafía del tramo medio de la sierra de Velasco y región oeste (La Rioja). *Bol Acad Nac Ci*, 42, 77-126, (1962).