



Caracterización morfométrica de la Cuenca del río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina

María Yanina Esper Angillieri¹, Laura P. Perucca¹

¹ CONICET- Gabinete de Neotectónica y Geomorfología, INGEO. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. Av. José I. de la Roza y Meglioli. Rivadavia. San Juan (5400).

* yaninaesper@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se evalúan aspectos hidrológicos de la cuenca del río Seco y su relación con los daños producidos en la localidad de Los Berros, al sur de la ciudad de San Juan, en el departamento Sarmiento durante las lluvias de enero de 2013. Los flujos de agua con detritos de carácter repentino o aluviones son uno de los principales peligros geológicos que afectan al departamento Sarmiento, éstos se producen como consecuencia de lluvias torrenciales y se caracterizan principalmente por sus importantes velocidades y gran poder destructivo.

Se analizan además, diversas características morfométricas de la cuenca y se calculan algunos parámetros básicos (área, perímetro, longitud, altitud y pendiente del cauce principal, entre otros). Estos cálculos son la base para predecir en forma aproximada el comportamiento de la cuenca ante la presencia de fuertes precipitaciones, que se traducen en importantes volúmenes de agua con caudales pico capaces de generar significativos aluviones. Los caudales pico estimados a base de las fuertes precipitaciones de enero de 2013 (84 mm/h) demuestran el comportamiento de la cuenca, que ante la presencia de lluvias excepcionales, se convierte en una zona potencialmente peligrosa con posibilidades de altos niveles de destrucción. Además, se describen las geoformas individualizadas en el área de la cuenca de drenaje que tiene como eje el piedemonte oriental de la Loma Redonda y el cerro Pedernal de los Berros. El estudio ha permitido explicar las características del relieve de la región y diferenciar distintas unidades geomorfológicas, las que generadas por diversos procesos geomórficos, han determinado el carácter complejo del paisaje regional.

Palabras clave: Morfometría, cuenca del río Seco, caudales pico, Los Berros, Argentina.

Abstract

In this paper we evaluate hydrological aspects of the Seco River basin and the relationship with damages that occurred in the town of Los Berros, south of the city of San Juan, in the Sarmiento department, during the torrential rains of January 2013. One of the main geological hazards that affect the Sarmiento department is flash floods, produced by heavy seasonal rains, characterized by their high velocities and destructive power

Several morphometric characteristics of the basin are analyzed and some basic parameters (area, perimeter, length, altitude and slope of the main channel, etc.) are calculated. These calculations are the basis for roughly predicting the behavior of the basin in the presence of torrential rainfall, resulting in large volumes of water with peak flows capable of generating significant floods. On the basis of the January 2013 rainfall (84 mm/h), the estimated peak flows demonstrated the basin behavior, which during the exceptional rainfalls becomes a potentially dangerous area with high levels of destruction.

Furthermore, a description is included of the landforms identified in the drainage basin, whose axes are the eastern piedmont of the Loma Redonda and the cerro Pedernal de Los Berros. The study allowed explanation of the relief features of the region and

recognition of several geomorphological units generated by various geomorphic processes that have determined the complex nature of the regional landscape.

Keywords: Morphometry, Seco river basin, peak discharges, Los Berros, Argentina.

1. Introducción

De acuerdo a NOAA/NWS (2013), un aluvión o avenida (*flash flood*) es un flujo de agua cargado de detritos extremadamente veloz que ocurre normalmente en zonas áridas.

Estos flujos son a menudo desastrosos debido a su condición de repentinos y, en zonas áridas, en la mayoría de los casos, son consecuencia de precipitaciones extraordinarias de una magnitud tal que la superficie de la cuenca no es capaz de asimilarlas en su totalidad. Estas avenidas crecen en magnitud cuando el índice de infiltración del terreno es reducido por lluvias previas.

Entre los flujos catastróficos a nivel mundial se destacan los del río Huang He en China en 1887, 1931 y 1938 donde se estima que perecieron unas 2000000 de personas, 4000000 de personas y hasta 900000 personas respectivamente (Grousset, 1959; Needham, 1986; Lary, 2004). Entre los recientes, se destacan los de enero de 2011 en el Estado de Río de Janeiro (Sudeste de Brasil) donde se reportaron 916 muertes; y los de junio de 2013 en el norte de India donde perecieron 5700 personas (CBS, 2013).

La Argentina ha sufrido estos eventos en varias ocasiones, entre los más notorios pueden mencionarse: El de diciembre de 1914, en el río Barrancas entre las provincias de Neuquén y Mendoza, donde perdieron la vida 300 personas (Hermanns *et al.*, 2004). El de febrero de 1944 en la quebrada de Carrizal (provincia de San Juan) donde las pérdidas de vida se estimaron en 35 (Esper Angillieri, 2007). En enero de 1992 en San Carlos Minas, en la provincia de Córdoba (Barbeito *et al.*, 2004), donde 30 personas perecieron y 40 fueron reportadas como desaparecidas.

Una característica distintiva de una cuenca pequeña (superficie < 130 km²) es que el efecto del escurrimiento superficial sobre las vertientes, más que el efecto del flujo en los cauces, es el factor dominante que controla los picos de crecidas (Hernández y López, 1972). En consecuencia, una cuenca de poca superficie como la cuenca del río Seco, con poco más de 38 km², es frágil y vulnerable a precipitaciones de alta intensidad y de corta o larga duración.

Las precipitaciones ocurridas durante la noche del miércoles 30 al jueves 31 de enero de 2013 provocaron una gran crecida en los principales ríos y quebradas en el departamento Sarmiento, que quedó registrada como la más intensa en la historia del departamento. Según los datos que dieron a conocer desde el Departamento de Hidráulica, el pico de intensidad que alcanzó aquella precipitación fue de

84 mm/h. Considerando que toda la estructura de defensas y colectores pluviales en la provincia está preparada para soportar, en el peor de los casos, una intensidad máxima de 60 mm/h, esta cifra es contundente.

Pasada las 22:00 la tormenta comenzó a descargar su furia en Sarmiento y cerca de la media noche la creciente empezó a bajar. Según relató a este medio el titular de la Cartera de Desarrollo Humano Daniel Molina, “el río seco de Los Berros se metió unos 15 m hacia dentro del cauce y se llevó una casa completa, arrancó árboles centenarios de raíz, se llevó por completo tendidos eléctricos y se llevó todo lo que encontró a su paso con una fuerza tremenda. En otras zonas el agua ingresó por completo en las viviendas y se llevó todo. Hay familias que perdieron hasta las zapatillas, es decir no les quedó nada”, relató. Es más, en la Localidad de Los Berros la creciente bajó con tanta fuerza y caudal que se llevó una casa por completo, dejándola a unos 200 metros del lugar donde fue construida (extracto del periódico Diario de Cuyo del 31 de enero de 2013).

La importancia de la morfometría de la cuenca en la génesis de los caudales es decisiva, porque es un factor determinante de la velocidad con la que van a circular las aguas sobre la superficie y, por tanto, de la rapidez de respuesta de la cuenca ante las precipitaciones. El cálculo de caudales consiste en estimar los valores de flujo (normalmente máximos) originados en una sección determinada de un cauce, para una precipitación concreta, que incide en la cuenca vertiente correspondiente a dicha sección. Normalmente se trata de calcular valores máximos para el dimensionamiento de obras o estudios de inundabilidad de márgenes y que puedan afectar a localidades ubicadas aguas abajo (Esper Angillieri, 2008, 2012; Perucca y Esper Angillieri, 2011).

En numerosos artículos, el análisis morfométrico es utilizado para la caracterización de cuencas tal como los de Topaloglu (2002), Moussa (2003), Sreedevi *et al.* (2004), Srinivasa Vittala *et al.* (2004), Mesa (2006), Perucca y Esper Angillieri (2011) y Esper Angillieri (2008, 2012).

El presente trabajo pretende analizar la morfometría, su geomorfología y las características hidrográficas principales de la cuenca de río Seco y estimar el caudal pico resultante de las fuertes precipitaciones ocurridas en enero de 2013, a fin de aportar elementos básicos para la zonificación de la susceptibilidad y peligrosidad de la zona estudiada ante la ocurrencia de futuras avenidas.

2. Descripción de área de trabajo

La cuenca del río Seco posee una superficie de 38.33 km² y está ubicada en el departamento Sarmiento, provincia de San Juan. La localidad de Los Berros (Figura 1), es atravesada por el río Seco y se localiza exactamente en el kilómetro 21 de la Ruta Nacional 153; su población de 3252 habitantes la convierte en una de las localidades más importantes del departamento Sarmiento. Económicamente se destaca por su importante actividad relacionada con la minería, tal vez entre una de las más importantes de la provincia de San Juan, donde se extrae la cal. En cuanto a la agricultura y ganadería, éstas se desarrollan en menor proporción.

2.1. Clima

La provincia de San Juan posee un clima árido y semiárido, la precipitación media anual es de 93.3 mm. En invierno las temperaturas oscilan entre 1 °C y 18 °C, los veranos son muy secos y calurosos con temperaturas entre 19 °C y 35 °C (Minetti *et al.*, 1986).

En la localidad de Los Berros (31° 57' latitud sur, 68° 39' longitud oeste y altura 800 msnm) según datos climáticos registrados en el periodo 1977 - 1983, la precipitación media anual fue de 107.6 mm; las temperaturas llegaron a 39.5

°C en el mes de febrero y en invierno, durante el mes de julio, bajaron a -05.0 °C (Fuente: Estación meteorológica "Los Berros", Sarmiento, San Juan). Entre los meses de enero y febrero las precipitaciones de corta duración, pero de carácter torrencial, son las responsables, en la zona, de la generación de importantes y veloces flujos con gran capacidad de carga.

Prácticamente todos los veranos se registra en la región la llegada de crecientes de gran magnitud, que ocasionan numerosos daños a las viviendas, red de riego, calles, cultivos y distribución de agua potable (Figura 2).

En los últimos tres años se destacan las lluvias ocurridas el 9 de diciembre de 2011, que produjeron daños en la ruta Nacional 153 que une la localidad de Los Berros y Pedernal con Barreal (Figura 2 a, b). El 23 de febrero de 2012, Sarmiento fue el departamento más afectado por la lluvia. Según informaron fuentes policiales, las precipitaciones comenzaron a las 21 horas y se extendieron hasta las 4 de la madrugada. Como consecuencia de esto, varios accesos quedaron intransitables y un camión fue arrastrado por la creciente (Figura 2c, d).

2.2. Geología

Las unidades litológicas reconocidas en la región pertenecen al ámbito de Precordillera Oriental. En las

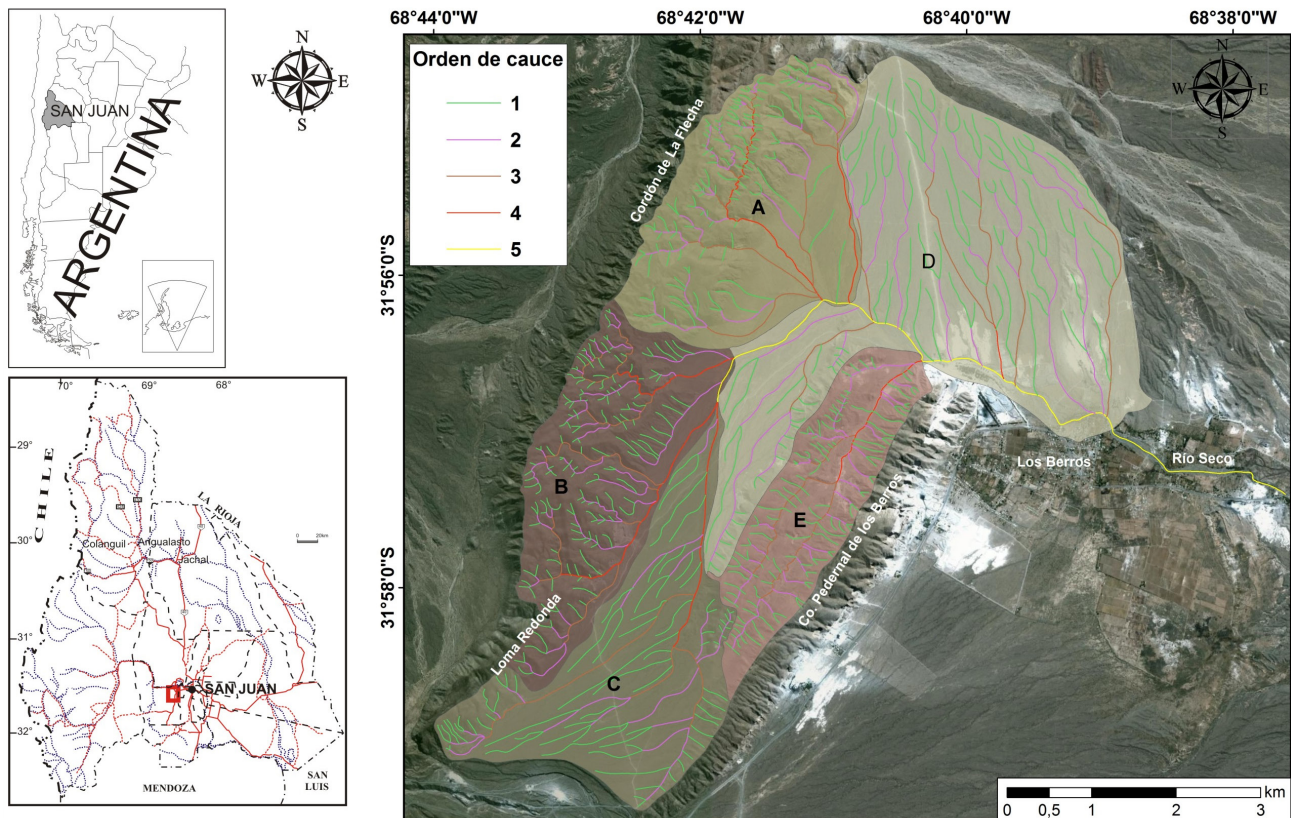


Figura 1. Ubicación del área de estudio y cuenca de 5^{to} orden del río Seco. La cuenca ha sido subdividida en 5 sub-cuencas, identificadas con letras mayúsculas desde la A a la E, (Esper Angillieri, 2014).



Figura 2. Daños producidos durante las lluvias torrenciales de verano en los accesos a la localidad de Los Berros a) Camión de carga proveniente de las explotaciones mineras del sector, arrastrado por la crecida del río durante las lluvias de enero de 2013, b) Camioneta dañada por la crecida del río al cruzar un sector del río, c) Vehículo utilitario afectado por la inundación de enero de 2013 y d) Corte y daños en la ruta Nacional 153, entrada a la localidad de Los Berros desde San Juan en enero de 2005, (Perucca, 2014).

zonas elevadas como Loma Redonda, cerros del Medio, La Chilca y Pederal de Los Berros y en el cordón de la Flecha, aflora una sucesión completa de carbonatos de plataforma que consta de Formaciones cuyas edades van desde el Cámbrico Temprano hasta el Ordovícico Medio (Figura 3) y son (de base a techo) las Formaciones calizas, margas y limolitas cámbricas de la Formación La Laja (Borrello, 1962), las dolomías de la Formación La Flecha (Baldis *et al.*, 1981) del Cámbrico superior y las calizas y margas de la Formación San Juan (Amos, 1954) del Ordovícico inferior. La Laja (Borrello, 1962), La Flecha (Baldis *et al.*, 1981) y San Juan (Amos, 1954). La secuencia continúa con una potente secuencia clástica del Silúrico, denominada Formación Rinconada (Amos, 1954), constituida por una *mélange* sedimentaria integrada por una compleja mezcla de bloques alóctonos de composición clástica y carbonática, inmersos en una matriz clástica fina, de estructura caótica y desordenada. Por encima afloran rocas carboníferas de la Formación Jejenes (Amos, 1954) que en la quebrada de La Flecha se encuentran principalmente representadas por areniscas pardas algo rojizas, en tonalidades medianas a oscuras, intruidas por cuerpos traquíticos triásicos (Traquita La Flecha) de color rojo ladrillo a amarillo y emplazados

como filones capas y diques (Rossa *et al.*, 1986). El Paleógeno – Neógeno está representado principalmente por areniscas, limolitas y conglomerados finos, con escasas intercalaciones tobáceas y tufíticas parcialmente alteradas a bentonitas. Los depósitos más recientes (Pleistoceno superior-Holoceno) constituyen cubiertas aluviales, depósitos de talud y relleno de cauces actuales. Las cubiertas clásticas de los niveles aluviales de distintas generaciones están vinculadas a la historia evolutiva de los cursos de agua que descienden de la vertiente oriental de los cordones montañosos calcáreos ubicados al oeste del área de estudio, pertenecientes a Precordillera Oriental. En los depósitos pertenecientes a abanicos aluviales, en los extremos norte y sur del área de estudio, se observan clastos de areniscas, grauvacas, calizas y rocas ígneas y casi nulo aporte calcáreo, vinculados a ríos de orden mayor que el Seco de Los Berros, cuyas cabeceras se encuentran al oeste de Precordillera Oriental, tales como el río de La Flecha y del Agua.

Estructuralmente, la Precordillera Oriental está caracterizada por sierras de rumbo meridional aproximadamente en toda su longitud; en general están integradas por estructuras plegadas en forma de grandes anticlinales asimétricos con vergencia al oeste, cuyos ejes

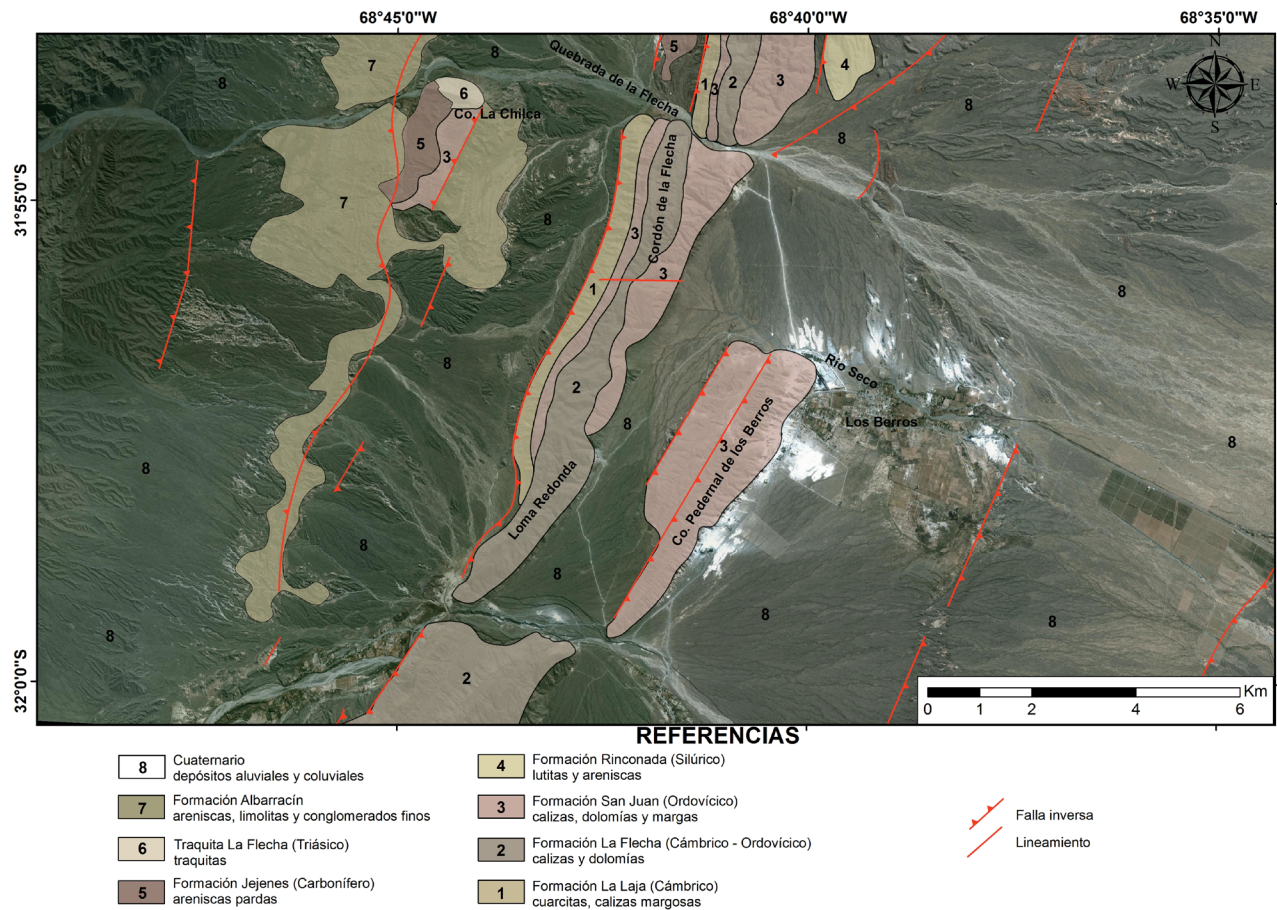


Figura 3. Mapa geológico de la cuenca del río Seco, (Esper Angillieri).

son paralelos a los ejes de los cordones montañosos. Los planos axiales buzan al este con alto ángulo, en tanto que la mayoría de los casos los flancos occidentales se presentan verticales, rebatidos o también suelen estar suprimidos por fallas inversas de alto ángulo y rumbo predominantemente norte-sur, marcando el límite occidental de Precordillera Oriental.

3. Métodos

Para el análisis del área se confeccionó un mapa geomorfológico de escala regional, a los fines de determinar las principales unidades litológicas que afloran en la región. El mapa geomorfológico (Figura 4), expone en forma aproximada la distribución y los límites de las grandes unidades morfológicas y además se representaron las geoformas principales a partir de sus diferencias morfogenéticas y morfodinámicas. Tanto los mapas geomorfológico y geológico como la delimitación de la cuenca y subcuencas se realizó a partir de la interpretación de imágenes satelitales de alta resolución adquiridas a partir de Google Earth™ (SPOT 5 con 2.5 m resolución espacial, de Agosto de 2002), con la ayuda de modelos

digitales de elevación (ASTER GDEM V2) (NASA, 2011). Las imágenes fueron georeferenciadas en coordenadas geográficas (WGS84) a través de tecnología SIG.

La determinación del orden de cuencas se basó en la metodología propuesta por Strahler (1964). La longitud del cauce principal (Lcp) y la longitud de la cuenca (L), fueron obtenidas de acuerdo con Schumm (1956). Las altitudes fueron obtenidas a partir del modelo digital de elevaciones (MDE) y a partir de este último se obtuvieron las pendientes. La delimitación de la cuenca y sub-cuencas y el cálculo de los parámetros morfométricos fueron realizada en ambiente SIG (ArcGis 9x). Los parámetros morfométricos fueron divididos en parámetros básicos tales como área (A), perímetro (P), longitud (L), orden de la cuenca (On), orden de curso (O), altura máxima y mínima (H, h), longitud total de cauces (Ltc), longitud de cauce principal (Lcp), longitud total de cauces de un orden determinado (Ln), número de cauces de un orden determinado (Nn); y parámetros derivados, obtenidos a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Relación de elongación} \quad Re = (\sqrt{4A/\pi}) / L \quad (\text{Schumm, 1956})$$

$$\text{Factor de forma} \quad Ff = A / L^2 \quad (\text{Horton, 1932})$$

$$\text{Sinuosidad del cauce} \quad S = Lcp / L \quad (\text{Schumm, 1977})$$

Ancho medio	$W_m = A / L$	
Desnivel de cuenca	$H_r = H - h$	(Hadley y Schumm, 1961)
Razón de relieve	$R_r = H_r / L$	(Schumm, 1956)
Número de rugosidad de Melton	$MRN = H_r / A^{0.5}$	(Melton, 1957)
Densidad de drenaje	$D_d = L_t c / A$	(Horton, 1932)
Frecuencia de cursos de n orden	$F_n = \sum N_n / A$	(Horton, 1932)
Textura de drenaje	$T_d = \sum N_n / P$	(Horton, 1945)
Relación de bifurcación	$R_b = N_{n-1} / N_n$	(Schumm, 1956)

Para el análisis de caudales se utilizaron registros pluviométricos aplicando el modelo matemático de simulación lluvia-caudal ARHYMO (Maza *et al.*, 1993) elaborado por el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Hídricas (actualmente INA) y el Consejo Federal de Inversiones, sobre la base de modelos pre-existentes. Se trata de un modelo de parámetros concentrados, determinístico, y lineal, ya que la relación entre la lluvia y el caudal es directa.

Para obtener mejores resultados la cuenca fue dividida en sub-cuencas, de acuerdo a sus características morfométricas y litológicas. Una vez delimitada la cuenca y sub-cuencas, fue necesario calcular el número de curvatura (CN) para cada sub-cuenca. CN es un parámetro estandarizado por el SCS (Soil Conservation Service, 1986), fue desarrollado como un índice que representa la combinación de los grupos hidrológicos del suelo, el uso de la tierra y la clase de tratamiento de la misma. Adquiere valores entre 0 (alta infiltración) y 100 (sin infiltración) y brinda una idea sobre la capacidad de retención de agua de la cuenca.

El modelo supone que la escorrentía es función de la precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía o CN. Este método es aplicable para cuencas menores a 250 km² y se puede aplicar para conocer la escorrentía mensual o anual.

Los parámetros morfométricos que se utilizan para el cálculo de caudales pico son el área de la cuenca, su pendiente y la longitud de su cauce principal.

Para la simulación de producción de caudales, se escogió la tormenta registrada la noche del miércoles 30 al jueves 31 de enero de 2013 en la que se registraron precipitaciones de 51.5 mm con una intensidad de 84 mm/h. Se consideraron diferentes escenarios en relación a la extensión espacial de tormentas, lluvia homogénea en toda la cuenca, en cada sub-cuenca en dos sub-cuencas y en tres sub-cuencas, éstas sin condiciones de humedad previa. Además se consideró una lluvia antecedente (reducción de infiltración).

4. Geomorfología

El paisaje en el área de estudio corresponde al tipo complejo, por su morfología genéticamente relacionada con diversos procesos geomorfológicos dominantes. Predominan aerealmente los exógenos tales como el fluvial y remoción en masa, los que conjuntamente con el endógeno

de la estructura antigua y la neotectónica, caracterizan el paisaje actual.

Desde el punto de vista morfoestructural, en sector de estudio se reconocieron de oeste a este tres unidades principales (Figura 4):

4.1. Unidad montañosa

En el área occidental se ubica el cordón montañoso llamado Loma Redonda (1347 msnm), mientras que hacia el este se destacan los cerros del Medio (1063 msnm) y Pedernal de Los Berros (1033 msnm), pertenecientes a Precordillera Oriental, encontrándose elevados por fallas inversas con vergencia al oeste en sus flancos occidentales. Los perfiles transversales son asimétricos, con pendientes más abruptas al oeste y cursos de corta longitud, mientras que sus flancos orientales poseen una pendiente menor y ríos de mayor longitud. Los cursos de agua frecuentemente poseen un marcado control estructural.

4.2. Unidad de Lomadas

Correspondiente a aquellos relieves positivos fallados y plegados menos prominentes que los montañosos. Al igual que los cordones tienen un rumbo en general NNE, con ligeras inflexiones. Estas lomadas se desarrollan principalmente en la parte central del abanico aluvial del río de La Flecha. Poseen una cubierta aluvial cuaternaria que se dispone sobre rocas de edad carbonífera y miocena. Este relieve positivo suele exhibir perfiles transversales asimétricos, siendo su flanco de mayor inclinación el occidental, ubicado en el sentido opuesto al del buzamiento de los estratos. En general los afloramientos se encuentran afectados por fallas inversas, convergencia occidental y rumbo N-S. En las lomadas compuestas por las unidades miocenas, se desarrolla un relieve de tierras malas (*bad lands*). Sus alturas máximas oscilan entre 800 y 900 msnm.

4.3. Unidad pedemontana

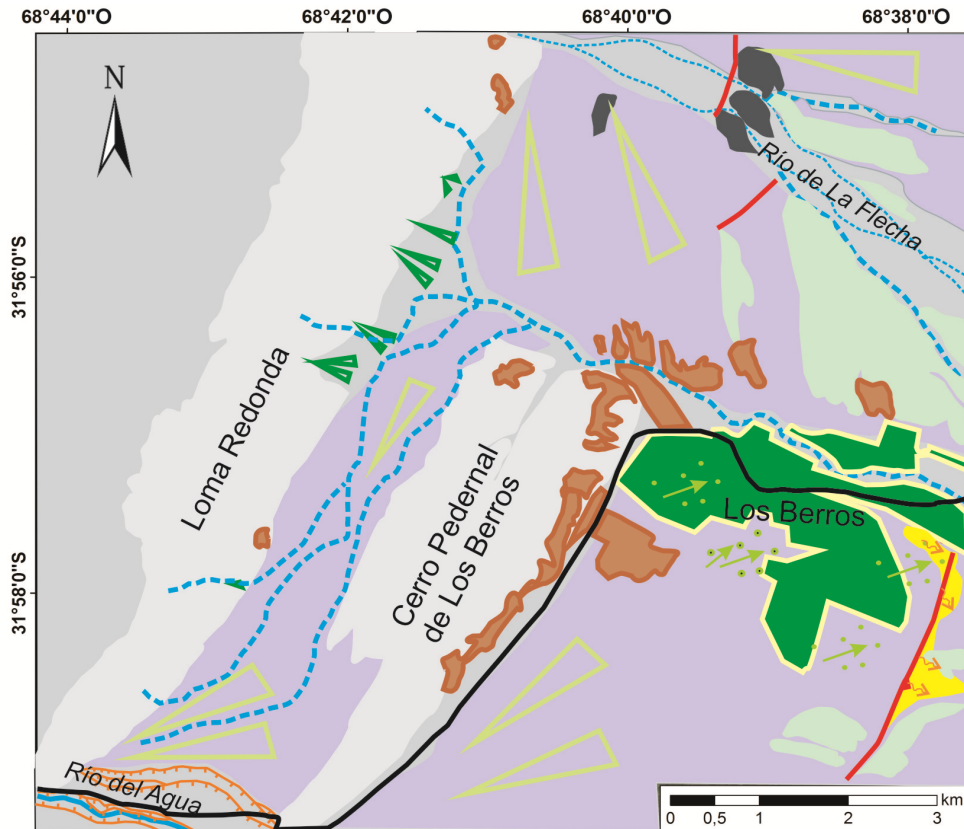
Este tramo conecta la zona montañosa con la planicie aluvial. Está constituida por distintos niveles aluviales, alguno de los cuales se encuentran afectados por fallas inversas con vergencia al oeste, con alto ángulo y actividad tectónica cuaternaria. Los depósitos que integran esta unidad están formados en el sector de estudio principalmente por clastos de caliza dispuestos sobre una sucesión de bancos de areniscas y limolitas del Neógeno. Las alturas que predominan en esta porción varían entre 700 y 900 msnm.

En las laderas de las sierras, por acción de procesos gravitacionales, los fragmentos angulosos de las rocas carbonáticas forman conos aluviales y coluviales, caracterizados por su tamaño reducido y sus elevadas pendientes, que varían entre 35° y 60°. Además de las planicies aluviales de los arroyos principales, se observan algunos niveles discontinuos de terrazas fluviales. Un

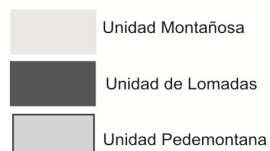
extenso abanico aluvial ha desarrollado el río de La Flecha, al norte del área de estudio donde se encuentran superficies agradacionales aterrazadas, las que han sido interpretadas como distintas generaciones de abanicos aluviales. Estos abanicos han sido generados por ríos con clastos subredondeados de areniscas, rocas ígneas y en forma subordinada, calizas y dolomías ubicados al oeste,

fuera del área de estudio.

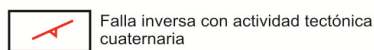
Hacia el sur y en el piedemonte oriental de la Unidad Montañosa descrita anteriormente se destacan numerosos abanicos aluviales de menor dimensión que el del río de La Flecha. Éstos se presentan como abanicos múltiples o anastomosados, en los que existe un solapamiento lateral entre los depósitos individuales de cada uno de ellos,



Unidades Morfoestructurales



Geoformas vinculadas a procesos endógenos *Morfogénesis Tectónica*



Otros *Formas Antrópicas*



Geoformas vinculadas a procesos exógenos *Morfogénesis Fluvial*



Figura 4. Bosquejo geomorfológico del área de estudio (Perucca).

cuya delimitación lateral es compleja pues se produce una interdigitación de los depósitos de los abanicos adyacentes, con la misma composición litológica.

Las cubiertas clásticas de los distintos niveles de abanicos aluviales ubicados a diferentes alturas, están vinculadas a la historia evolutiva de los cursos que descienden de la vertiente oriental de las sierras de Precordillera Oriental, constituidos por rodados de caliza, los cuales constituyen el 100 % de la composición. Los cauces actuales presentan relleno aluvial de granulometría variable, los mayores tamaños cercanos al punto de ruptura de la pendiente.

Martos (1995) interpretó que las cubiertas aluviales cuaternarias corresponden a depósitos típicos de facies aluviales, acumuladas a partir de crecientes provenientes de las áreas montañosas colindantes. Así, las crecientes encauzadas en cañones montañosos, al arribar a zonas de relieves subhorizontales, depositaron la mayor parte de su carga en forma de mantos aluviales. Estas crecientes con capacidad y competencia para transportar grandes masas de aluviones desordenados y heterométricos, produjeron en el piedemonte, según los valores de pendiente, excavación lateral o vertical.

Además, en el sector suroeste del área analizada, es posible apreciar restos de terrazas del antiguo abanico aluvial del río del Agua, también antecedente y de variada composición litológica, el cual actualmente está interrumpido por el ascenso del cerro Pedernal de Los Berros, drenando actualmente sus aguas hacia la cuenca del río Seco.

5. Resultados y Discusión

Las formas del paisaje resultante en la región se deben a procesos degradacionales y agradacionales vinculados a la acción fluvial, gravitacional y aluvial, así como a la actividad neotectónica, con anticlinales y fallas inversas y cabalgamientos con vergencia occidental que afectan el piedemonte generando escarpas a contrapendiente, con la cara libre al oeste y rumbo N-S.

La participación de los distintos procesos exógenos y endógenos, le confieren al área el carácter de compuesto. Entre los procesos exógenos erosivos principales, se destacan la erosión fluvial y pluvial. La erosión hídrica se produce principalmente en el piedemonte de Precordillera Oriental, durante los meses de verano, en forma de manto en los sectores distales de menor pendiente y formando cárcavas donde predominan los materiales finos. La erosión en cárcavas en los afloramientos neógenos originó un paisaje típico de *badlands* o tierras malas. La sedimentación fluvial se produce principalmente en el área pedemontana, como relleno de cauces. Otras formas de acumulación son los depósitos coluviales en los flancos montañosos originados por la acción de la gravedad.

Las inundaciones en la región se originan como crecidas o avenidas que originan anegamientos en las localidades

ubicadas aguas abajo de los cordones montañosos, sectores medios y distales en los abanicos aluviales. Ellas se caracterizan por su migración y desplazamiento del área de la inundación y aunque suelen ocurrir en la zona activa del abanico, pueden producirse cambios en el patrón de drenaje y afectar zonas no previstas. La localidad de Los Berros es afectada por las inundaciones provenientes de los abanicos aluviales localizados en el piedemonte oriental de las serranías constituidas por rocas carbonáticas, por lo que los detritos transportados tienen exclusivamente esa composición.

En la cuenca del río Seco de 5^{to} orden (Figura 1), se han identificado un total de 749 cursos fluviales, de los cuales 584 son de 1^{er} orden, 125 de 2^{do}, 30 de 3^{er}, 7 de 4^{to} y finalmente 1 curso indicando el 5^{to} orden de la cuenca.

Esta cuenca cubre una superficie (A) de 38.33 km² y posee un perímetro (P) de 32.22 km, una longitud total (L) de 10.40 km y un ancho medio (Wm) de 3.68 km, estos pequeños valores por sí solos suponen menores tiempos de concentración de la escorrentía superficial y mayor susceptibilidad a experimentar crecidas con picos pronunciados y corta duración.

La longitud de su cauce principal (Lcp) es de 14.6 km, mientras que la longitud total de todos sus cauces (Ltc) es de 255.47 km. Presenta una red de drenaje con un diseño dendrítico en las zonas elevadas y divergente a paralelo en las bajadas aluviales, una relación de elongación (Re) de 0.67 y un factor de forma (Ff) de 0.35, que revelan una cuenca ligeramente elongada con desnivel (Hr) de 426 m. La sinuosidad (S) que toma valores mayores a 1, revela un cauce principal no tan rectilíneo de tipo entrelazado en algunos tramos. El número de rugosidad de Melton (MRN) es de < 0.3; por lo tanto esta cuenca es más susceptible a la ocurrencia de flujos con bajo contenido de material. Los altos valores de densidad de drenaje (Dd) señalan una cuenca bien drenada con gran desarrollo, mientras que la textura de drenaje (Td) revela la existencia de material más impermeable en las cabeceras y laderas de la cuenca que en su tramo inferior. Los parámetros morfométricos de esta cuenca se exponen en la Tabla 1 y los valores de CN (número de curva) asignados a cada sub-cuenca se detallan en la Tabla 2.

Los valores del factor de forma y la densidad de drenaje de la cuenca indican una cuenca ligeramente alargada, Gregory y Walling (1973) señalaron que cuanto más redonda es una cuenca más retardo existe entre el momento de precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, más acusada y súbita es la misma crecida, y por tanto más alto el riesgo de aluviones. A base de esta afirmación, los parámetros calculados no favorecerían la ocurrencia de crecidas súbitas por lo que existen bajas probabilidades de experimentar frecuentes aluviones, debido a que su forma no permite exponer toda su superficie al radio de acción de una determinada tormenta. Sin embargo, estas afirmaciones son relativas, ya que ello depende del tamaño o extensión de la tormenta

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la Cuenca del río Seco.

Cuenca del río Seco						
A [km ²]	P [km]	L [m]	H [msnm]	h [msnm]	Ltc [m]	Lcp [m]
38.329	33.218	10401.974	1160	734	255469.479	14593.067
Re	Ff	S	Wm [m]	Hr [m]	Rr	MRN
0.672	0.354	1.403	3684.803	426	0.041	0.069
O	Nn	ln [m]	Fn [n/km ²]	Td [n/km]	Rb	
1	584	132454.90	15.24	17.58	4.67	
2	125	64484.24	3.26	3.76	4.17	
3	30	34722.22	0.78	0.90	4.29	
4	7	15403.97	0.18	0.21	7.00	
5	1	8404.14	0.03	0.03		
Sub-cuencas	P [m]	A [km ²]	Lcp [m]	H [msnm]	h [msnm]	Hr [m]
A	11162.74	6.792	3960.79	1350	845	505
B	12316.60	5.961	5030.90	1179	873	306
C	14299.90	6.510	6217.56	1157	886	271
D	20623.77	13.159	6796.64	949	782	167
E	10824.09	3.965	5007.62	1084	834	250

Tabla 2. Número de Curvatura para cada sub-cuenca.

Sub-cuenca	A	B	C	D	E
CN	77	77	63	63	77
CN*	88	88	80	80	88

* humedad previa

y de la duración e intensidad de la misma. Asimismo, la probabilidad de que se presenten crecidas con picos de caudales pronunciados y de corta duración es alta, debido a las características del relieve, como lo indican los valores obtenidos con la simulación lluvia-caudal (Tabla 3), que señalan un alto peligro de aluviones (*flash floods*), con caudales pico de más de 120 m³/s. Además se observa que al considerar condiciones de humedad previa, es decir lluvia en los días anteriores, los caudales pico de salida se multiplican, esto es debido a que la lluvia antecedente impermeabiliza los suelos permitiendo un mayor drenado de las aguas y convirtiendo a la cuenca en potencialmente peligrosa no obstante su forma ligeramente alargada. Trabajos anteriores en distintas zonas de la Precordillera de San Juan (Esper Angillieri, 2008, 2012; Perucca y Esper Angillieri, 2011) han arrojado resultados similares.

Por otro lado, considerando que el arroyo principal de la cuenca posee un caudal medio que no supera los 3 m³/s, aunque se considerara una validez de sólo el 50 %, los resultados obtenidos señalan un alto peligro de aluviones (*flash floods*).

Es preciso aclarar que los caudales resultantes a partir de la aplicación de modelos matemáticos son sólo aproximaciones y su validez es controversial, ya que es muy difícil predecir la extensión espacial de las tormentas sin contar con registros hidrometeorológicos continuos en las cabeceras de las cuencas y sub-cuencas. Sin embargo, en áreas donde se carecen de estos registros, como es el caso de gran parte del centro-oeste argentino, una prueba fehaciente

Tabla 3. Caudales pico (m³/s) resultantes de la aplicación del modelo matemático

Caudales Pico (m ³ /s)		
	s	h
Toda la cuenca	50.9	128.7
Sub-Cuenca A	19.9	41.9
Sub-Cuenca B	15.3	32.6
Sub-Cuenca C	3.5	18.9
Sub-Cuenca D	5.5	29.6
Sub-Cuenca E	10.8	22.9
Sub-Cuencas A+B	35.2	74.5
Sub-Cuencas A+B+E	46.0	97.4
s (sin condiciones de humedad previa). h (lluvia antecedente)		

de la peligrosidad de estas cuencas son los acontecimientos de enero de 2013 anteriormente descritos.

6. Conclusiones

Del análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje se desprende que la rapidez en la concentración de las aguas se ve favorecida especialmente por el tamaño de la cuenca y los desniveles, más que por los

índices de forma, de manera que puede concluirse que las características morfométricas, en general, no incrementan, sino que más bien atenúan los efectos y la vigorosidad de las crecidas, debido a que su forma no permite exponer toda su superficie al radio de acción de una determinada tormenta. Sin embargo, estas afirmaciones son relativas, ya que ello depende del tamaño o extensión de la tormenta y de la duración e intensidad de la misma, asimismo la existencia de lluvias previas reduce la infiltración y aumenta consiguientemente la impermeabilidad de la cuenca, favoreciendo una rápida descarga y volviéndola potencialmente peligrosa. Esto queda evidenciado con los acontecimientos ocurridos en la zona en enero de 2013 donde mediante la simulación lluvia-caudal, se calcularon caudales pico de hasta 120 m³/s.

Este análisis morfométrico junto a los valores de caudal calculado, sirve de base para la posterior estimación de caudales pico de crecidas para distintos períodos de retorno y duración de lluvia como una función directa de sus parámetros morfométricos. Además, aporta elementos de gran importancia al diseño hidráulico e hidrológico de estructuras para el control de crecientes y de sedimentos, así como para el análisis, evaluación y zonificación de la susceptibilidad por inundaciones y remoción en masa.

Los abanicos coalescentes ubicados al este de los cordones montañosos de Precordillera Oriental constituyen el soporte físico de pequeñas poblaciones agrícolas y mineras de la región, así como de los procesos de inundación recurrentes en los meses de verano. Las áreas vulnerables en estos abanicos se pueden deducir principalmente de los canales y paleocanales delimitados y de las descripciones de las inundaciones históricas. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que cada abanico tiene sus propias condiciones de estabilidad y la posibilidad de migración de sus cauces funcionales es un proceso importante que hay que tener en cuenta en cualquier estudio y evaluación del peligro de inundaciones.

Finalmente, es improbable que en la zona se plantee un reordenamiento poblacional, ya que los habitantes de localidades rurales como la de Los Berros, han permanecido en este sitio por varias generaciones y sus viviendas y actividades económicas se concentran allí. Por ello, es aconsejable la implementación de obras de contención y/o mitigación que ayuden a reducir y mitigar pérdidas en la población.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido financiado por el PICTO 0013-Agencia y PIP 0199 CONICET. Las autoras expresan su sincero agradecimiento a los evaluadores por sus valiosas sugerencias que contribuyeron al mejoramiento de este trabajo.

Referencias

- Amos, A.J., 1954, Estructura de las formaciones paleozoicas de la Rinconada, pie oriental de la Sierra Chica de Zonda, San Juan: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 9(1), 5-38.
- Baldís, B., Bordonaro, O., Beresi, M., Uliarte, E., 1981, Zona de dispersión estromatolítica en la secuencia calcáreo dolomítica del Paleozoico inferior de San Juan, en Octavo Congreso Geológico Argentino: San Lius, Argentina, 2, 419-434.
- Barbeito, O., Ambrosino, S., Bertoni, J.C., Paoli, C.U., 2004, Inundaciones Severas por Crecidas Extremas. Capítulo 9, en Bertoni, J.C., *Inundaciones Urbanas en Argentina*, 270 p.
- Borrello, A., 1962, Caliza La Laja (Cámbrico medio de San Juan): *Notas Comisión Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires*, 2, 3-8.
- Esper Angillieri, M.Y., 2007, El aluvión del 13 de febrero de 1944 en la Quebrada del Carrizal, Departamento Iglesia, Provincia de San Juan: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 62(2), 283 - 288.
- Esper Angillieri, M.Y., 2008, Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina: *Environmental Geology*, 55, 107-111.
- Esper Angillieri, M.Y., 2012, Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to the evaluation of flash floods hazard, San Juan, Argentina: *Quaternary International*, 253, 74-79.
- Gregory, K.J., Walling, D.E., 1973, Drainage basin form and processes. A geomorphological approach: London, Arnold, 472 p.
- Grousset, R., 1959, *The Rise and Splendour of the Chinese Empire*: University of California Press, 303 p.
- Hadley, R.F., Schumm, S.A., 1961, Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River Basin: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1531-B, 198 p.
- Hermanns, R.L., Niedermann, S., González Díaz, F.E., Folguera, A., Ivy-Ochs, S.D., Kubuk, P., 2004, Landslide dams in the Argentine Andes: NATO Advanced Research Workshop Security of natural and artificial rockslide dams, Bishkek, Kyrgyzstan, 79-85.
- Hernández, E., López, J., 1972, Conceptos sobre manejo de cuencas montañosas: *Revista Forestal Venezolana*, 15(22), 53-81.
- Horton, R.E., 1932, Drainage basin characteristics: *Transactions of the American Geophysical Union*, 13, 350-361.
- Horton, R.E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology: *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370.
- Lary, D., 2004, The Waters Covered the Earth: China's War-Induced Natural Disaster, en Selden, M., Alvin Y. (eds): *War and State Terrorism: The United States, Japan, and the Asia-Pacific in the Long Twentieth Century*, 143-170.
- Martos, L., 1995, Análisis morfo-estructural de la faja pedemontana oriental de las sierras de Marquesado, Chica de Zonda y Pedernal, su aplicación para prevenir riesgos geológicos, Provincia de San Juan. República Argentina: Universidad Nacional de San Juan, tesis doctoral, 555 p.
- Maza, J., Fornero, L., Litwin, C., Fernández, P., 1993, Modelo hidrológico ARHymo. Manual del usuario: INCYTH-Centro Regional Andino, Mendoza, 92 p.
- Melton, M.A., 1957, An analysis of the relation among elements of climate, surface properties and geomorphology: Office of Naval Research Project NR389-042, Department of Geology Columbia University, New York, Technical Report 11, 102 p.
- Mesa, L.M., 2006, Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina): *Environmental Geology*, 50, 1235-1242.
- Minetti, J.L., 1986, El régimen de precipitaciones de San Juan y su entorno: CIRSAJ-CONICET- UNSJ, Informe técnico 8, San Juan, 19-22.
- Moussa, R., 2003, On morphometric properties of basin, scale effects and hydrological response: *Hydrological Processes*, 17, 33-58.
- NASA., 2011, ASTER Global Digital Elevation Map V2, *disponible en*: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration's/National Weather Service, 2013, *disponible en*: <http://www.weather.gov/glossary/>.

- Needham, J., 1986, Science and Civilization in China. Vol. 1. Introductory Orientations: Caves Books Ltd. (Taipei), 68 p.
- Perucca, L.P., Esper Angillieri, M.Y., 2011, Morphometric characterization of the Molle Basin applied to the evaluation of flash floods hazard, Iglesia Department, San Juan, Argentina: Quaternary International, 233, 81-86.
- Rossa, N., Uliarte, E., Vaca, A., 1986, Magmatismo Traquítico en Precordillera Oriental, San Juan, en Primeras Jornadas sobre Geología de Precordillera, San Juan, Argentina, I, 337-341.
- Schumm, S.A., 1956, Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Ambos, New Jersey: Geological Society of America Bulletin, 67, 597-646.
- Schumm, S.A., 1977, The fluvial system, New York, John Wiley & Sons, 338p.
- Soil Conservation Service., 1986, Urban hydrology for small watersheds, TR-55, 2nd ed, USA, 164 p.
- Sreedevi, P.D., Subrahmanyam, K., Ahmed, S., 2004, The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain: Environmental Geology, 47, 412-420.
- Srinivasa Vittala, S., Govindaiah, S., Honne Gowda, H., 2004, Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada area of Tumkur district, South India using remote sensing and gis techniques: Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 32 (4), 351-362.
- Strahler, A.N., 1964, Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks, *en* Chow, V.T. (ed), Handbook of applied hydrology: New York, McGraw Hill, 4-76.
- Topaloglu, F., 2002, Estimation of instantaneous peak flows in Seyhan river basin using regional regression procedures: Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 26, 47-55.
- Manuscrito recibido: Julio 29, 2013.
 Manuscrito corregido recibido: Marzo 27, 2014.
 Manuscrito aceptado: Marzo 28, 2014.