

CAPÍTULO 1

MORFOMETRÍA DE LA CUENCA DEL ARROYO BARÓ (SAN ROQUE, CORRIENTES)

Juana Bolo¹

Humberto Smichowski²

David Morel³

Elsie Araseli Ojeda⁴

Félix Ignacio Contreras⁵

- 1.- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste. juanibolo1@gmail.com
- 2.- Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CECOAL – CONICET / UNNE)
- 3.- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste.
- 4.- Instituto de Investigaciones Geohistóricas (IGHI – CONICET / UNNE)
- 5.- Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CECOAL – CONICET / UNNE) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste.



MORFOMETRÍA DE LA CUENCA DEL ARROYO BARÓ (SAN ROQUE, CORRIENTES)

MORPHOMETRY OF THE BARÓ STREAM BASIN (SAN ROQUE, CORRIENTES)

*Juana Bolo
Humberto Smichowski
David Morel
Elsie Araseli Ojeda
Félix Ignacio Contreras*

Resumen

Los estudios morfométricos de cuencas hidrográficas constituyen las bases para la comprensión de las dinámicas fluviales, de los elementos y factores morfológicos que influyen e intervienen y, por lo tanto, sus conocimientos son fundamentales para el ordenamiento territorial. El objetivo del trabajo es conocer cuáles son las características morfométricas de la cuenca del arroyo Baró, de gran importancia local, puesto que gran parte de su tramo medio hasta su desembocadura se ubica en el ejido urbano de la localidad de San Roque. En este sentido, el reducido tamaño y las características de su cuenca influye sobre la ciudad que se encuentra bajo la amenaza constante de riesgos por inundación, los cuales se manifiestan de manera recurrente y repentina. Este trabajo constituye un primer aporte en la contribución de la planificación urbana, como así también, en la mitigación y alerta temprana de riesgos de inundaciones.

Palabras clave: Morfometría, Cuencas Hidrográficas, Corrientes.

Abstract

The morphometric studies of hydrographic basins constitute the bases for the understanding of the fluvial dynamics, and of the morphological elements and factors that influence and intervene; therefore, knowing about them is fundamental for territorial ordering. The aim of this paper is to show what are the morphometric characteristics of the Baró stream basin, of great local importance, since a large part of its middle section up to its mouth is located in the urban area of the town of San Roque. In this sense, the small size and characteristics of its basin influence the city, which is under the constant threat of flood risks, which manifest themselves recurrently and suddenly. This work constitutes a first contribution in support of urban planning, as well as in the mitigation and early warning of flood risks.

Keywords: Morphometry, hydrographic basins, Corrientes.



1. Introducción

La cuenca hidrográfica es un área de captación natural de aguas de precipitaciones, formada por un conjunto de manantiales que conforman una red de drenaje, que dirige el flujo a un punto de salida único, conocido como exutory (Tucci, 1997).

Las cuencas hidrográficas son las unidades de análisis territorial de los estudios hidrológicos, y su importancia radica en que en ellas se encuentran los recursos naturales y se asientan las poblaciones (Salas Salinas y Jiménez Espinoza, 2004).

Considerar los parámetros morfométricos en cuencas hidrográficas es importante para evaluar el sistema hidrológico (Maidment, 1992; Camino et al., 2018). Las variables de forma, relieve y red de drenaje revelan el comportamiento morfodinámico e hidrológico de las cuencas (Salas Aguilar et al., 2011; Gaspari, 2012; Cruz Romero et al., 2015; Aumassanne et al., 2018; Moretto et al., 2019). El caudal y las crecidas modifican las propiedades morfométricas y morfológicas como el tamaño, la forma y la pendiente, que resultan muy importantes en la respuesta del volumen de agua acopiada y operan tanto para atenuar, como para intensificar las crecidas, influye, además, sobre el flujo y la velocidad de su movimiento (González de Matauco, 2004). Es por ello que, para "la correcta gestión de los recursos es necesario obtener información sobre las características morfométricas de la cuenca, para influir en el sistema hidrológico y, en consecuencia, la dinámica del ecosistema" (Teodoro, Teixeira, Costa y Fuller, 2007, p. 43).

Según Popolizio (1986), la provincia de Corrientes tiene muy baja amplitud de relieve (unos 200 m de diferencia entre sus cotas extremas: 220 y 20 m), en los extremos NE y SO respectivamente predomina el aspecto de extensas planicies en el oeste y suaves colinas en el este. La red hídrica posee escaso desarrollo y se desdibuja hacia las cabeceras lo cual dificulta la traza de la divisoria topográfica. Es común la presencia de paisajes anegadizos de bañados, esteros y lagunas, que hacia sus desembocaduras se canalizan y forman arroyos con los que se relacionan difusamente (Contreras y Odriozola, 2016).

Con amplia ocupación territorial se destacan las cuencas de los arroyos Empedrado y Riachuelo, en este último la presencia de esteros homónimos cuyos ambientes acuáticos ocupan el 30% de la superficie, mientras que durante las inundaciones se extienden hasta un 45% (Bonetto et al., 1978).

La presión antrópica sobre los recursos naturales (suelo y agua) y el crecimiento de la población, plantea la necesidad de un ordenamiento ambiental que anticipe el riesgo. Las personas comienzan a ocupar lugares cercanos al centro de la ciudad sin tener en cuenta los problemas y la consecuencia de su ubicación. Concretar un asentamiento poblacional sin un análisis del lugar conlleva a generar problemas de diferente índole. En las cuencas hidrográficas los riesgos se manifiestan por crecientes e inundaciones que afectan de forma negativa la vida de las personas que están en zonas aledañas a las cuencas. Por lo tanto, es necesario realizar un estudio de áreas inundables y/o anegables a fin de minimizar el riesgo.

En este marco, los conocimientos referidos a la topografía del lugar constituyen la base de toda investigación referida al estudio directa o indirectamente de los paisajes, sus dinámicas y evolución, cuya información resulta de interés a diversas ciencias y no exclusivamente a la geografía.

En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica, a través de los Modelos Digitales de Elevación (MDE), proponen herramientas de análisis espacial que permiten identificar áreas desfavorables para la instalación urbana. Felicísimo (1999), describe la altimetría de un lugar mediante una serie de datos acotados que sirven de base para construir un conjunto de modelos que derivan y se elaboran a partir de la información contenida explícita o implícitamente en el MDE.

Los avances de las tecnologías espaciales en las últimas décadas permiten contar con información detallada de la superficie terrestre. El uso de herramientas geoespaciales y procesamientos en sistemas de información geográfica cobra relevancia en estudios morfométricos porque permite la medición automática de los parámetros físicos de las cuencas hidrográficas de forma rápida y bajo costo (Brubacher, Oliveira y Guasselli, 2011; Viramontes et al. 2007, p. 22).

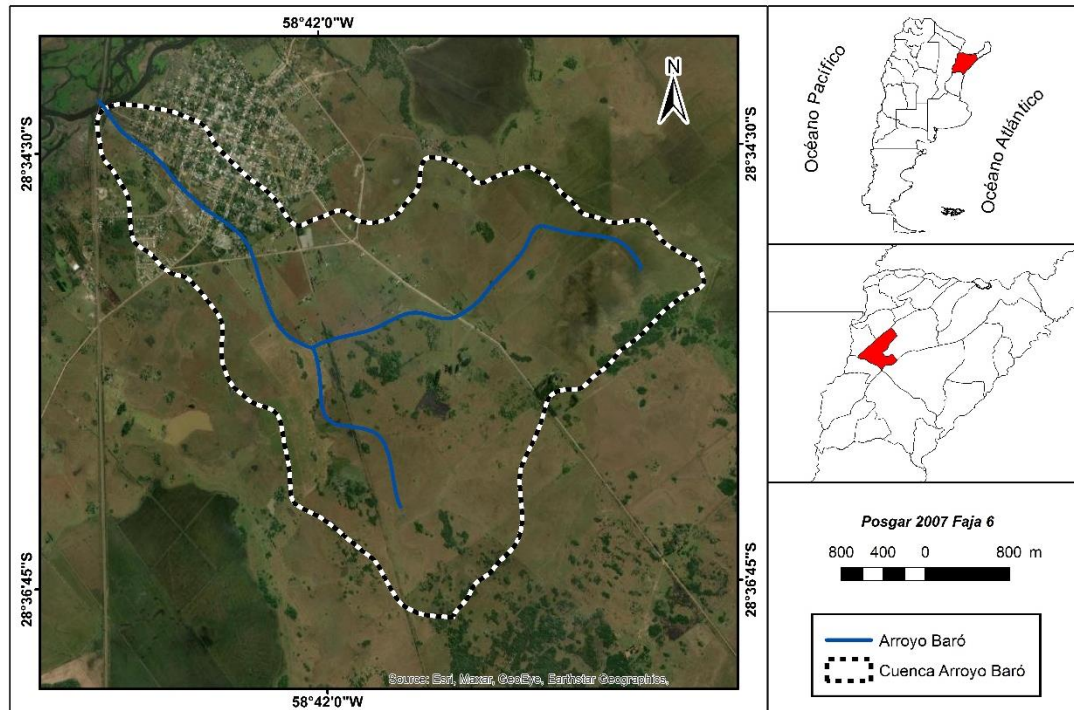
Además, se recorre el área de estudio a fin de analizar, por un lado, los problemas del comportamiento hidrológico natural de la cuenca y por otro, los sectores que se encuentran intervenidos.

En el presente trabajo se realiza un estudio planialtimétrico y morfométrico de la cuenca del arroyo Baró de la localidad de San Roque, se emplea herramientas Geoespaciales, se establece la influencia de ambos factores en la intensificación o atenuación de las crecidas a los fines de generar datos útiles para la planificación territorial y mitigación del riesgo.

2. Área de estudio

La ciudad de San Roque (Figura 1) se ubica en el sector Centro-Oeste de la provincia, sobre la margen izquierda del río Santa Lucía, uno de los principales cursos fluviales autóctonos del territorio, el cual descarga las aguas de vastas regiones de humedales homónimos, localmente conocidos como esteros. No obstante, dentro del ejido urbano de la ciudad, se localizan pequeños arroyos de cuencas muy reducidas y de los cuales se destaca el arroyo Baró.

Figura 1
Área de estudio



Nota: Elaboración propia.

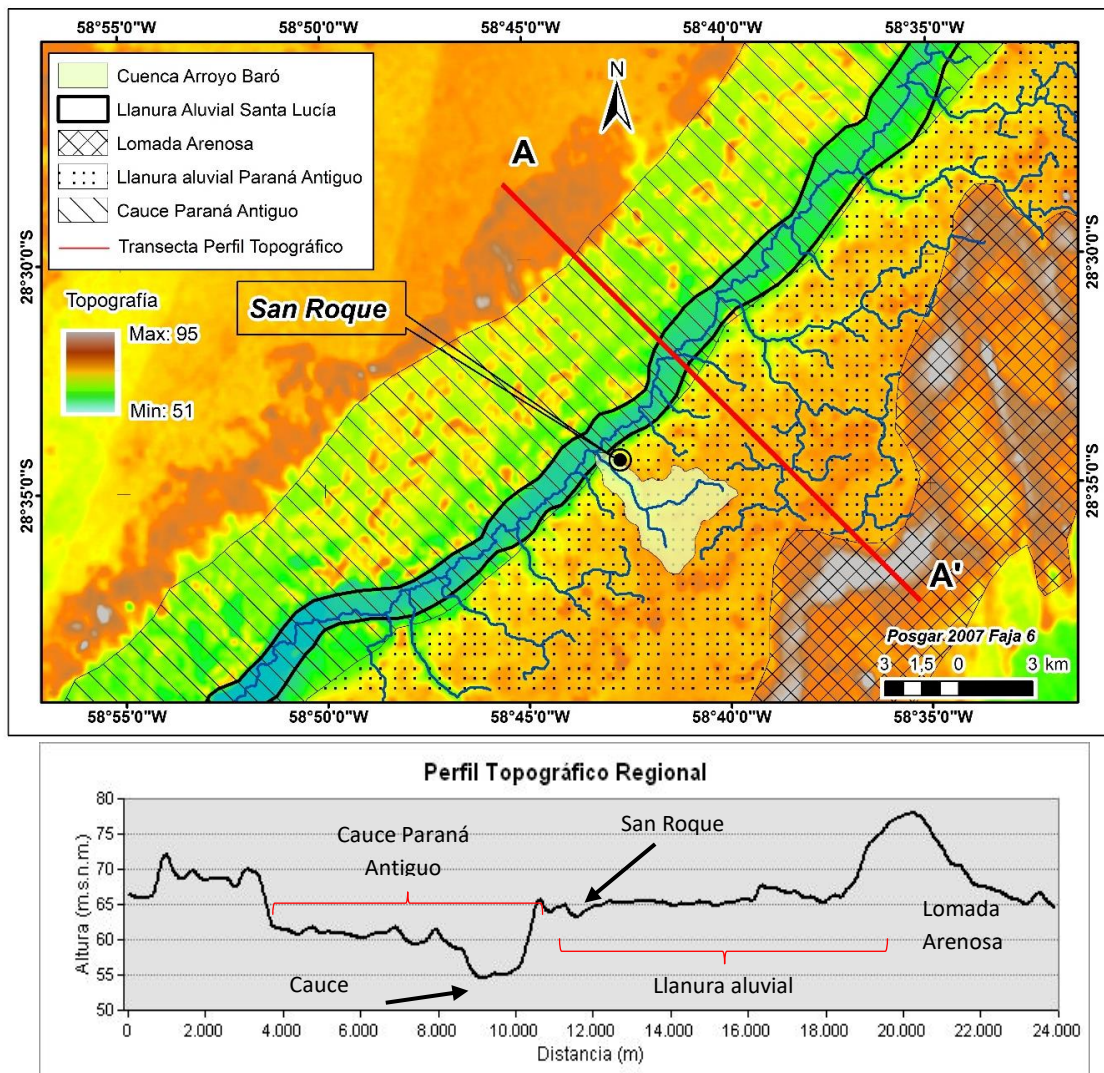
Este curso de agua, el cual posee una disposición perpendicular al río Santa Lucía, nace en un área anegadiza localmente conocida como cañada que, a diferencia de los esteros, tiene

un tiempo de permanencia del agua menor y su extensión es mucho más reducida. En este contexto, el arroyo Baró se describe como un curso de agua pequeño que se desarrolla sobre un terreno relativamente plano y con escasa pendiente. Por otra parte, si bien su alta cuenca se encuentra en una zona rural, gran parte de su recorrido hasta su desembocadura lo realiza en áreas urbanas y periurbanas, esto constituye un factor de amenaza y expone a la población a riesgos por inundaciones repentinas (Figura 1)

Los cursos menores de la cuenca -como el arroyo Baró- proviene desde las lomadas arenosas y desemboca en el río Santa Lucía en forma perpendicular, de acuerdo con el modelado del río Paraná en la región.

Cabe destacar, que el río Santa Lucía recorre un antiguo cauce labrado por el Paraná con dirección noreste-sudoeste, el cual posiblemente ocupaba el ancho total de la llanura aluvial actual río. Por su parte, los pequeños tributarios actuales de la margen izquierda de este último se desarrollan sobre relieves planos anegadizos que se caracterizan por la presencia de cañadas y bañados, que probablemente formaban llanuras de inundación del río Paraná (Orfeo, 2005) (Figura 2).

Figura 2
Relieve regional



Nota: Elaboración propia

Esta génesis del relieve y paisaje actuales les imprime sus características morfométricas a las diferentes cuencas de drenaje de la región (Pissara et al., 2004). A su vez, es posible advertir que sobre la margen izquierda se emplaza la localidad de San Roque y ésta se ubica más elevada que la margen derecha, sin embargo, ambas están bajo amenaza por inundación.

La cuenca posee un clima subtropical con temperaturas medias de 21° C y precipitaciones medias anuales en el orden de los 1400 mm, (Pyszczek, 2016), las cuales se desarrollan con mayor abundancia entre las estaciones de primavera y otoño. No obstante, en el área de estudio se desarrollan eventos meteorológicos de gran magnitud, cuyos montos pluviométricos superar los 100 mm en menos de una hora.

En función de la gran distribución de ríos, esteros, cañadas y lagunas que posee la provincia de Corrientes, Contreras y Odriozola (2016) definen tres tipos de amenazas por inundaciones y anegamientos. En primer lugar, las inundaciones por desborde de los ríos Paraná y Uruguay (Tipo de riesgo 1), principales cursos de agua. En segundo lugar, los riesgos de inundaciones y anegamientos de cursos autóctonos (Tipo de riesgo 2), los cuales son tributarios de los anteriormente mencionados y, por último, el anegamiento de áreas deprimidas (Tipo de riesgo 3) correspondientes a paleocauces, esteros, cañadas, lagunas, etc. En este sentido, el arroyo Baró constituye una amenaza Tipo 2, las cuales, para los autores, son las más peligrosas debido a la mayor incertidumbre que generan las alturas de las aguas como respuesta a las precipitaciones locales.

3. Materiales y métodos

El desarrollo del análisis morfométrico de la cuenca se realiza con el Modelo Digital de Elevación de 30 m de resolución espacial, adquirida del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2020) correspondiente a la hoja 2960-12, escala 1:100000. Este DEM se desarrolló a partir de datos capturados durante las misiones *Shuttle Radar Topography Mission*, (SRTM), llevada adelante por la NASA en el año 2000, y *Advanced Land Observing Satellite "DAICHI"* (ALOS), de la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA) en el año 2014, y contiene alturas corregidas y vinculadas con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16) (IGN, 2020).

Tabla 1

Variables de medición directa

Variable	Unidad	Definición
Área (A)	km ²	Proyección ortogonal del área de drenaje de un sistema de escorrentía.
Perímetro (P)	km	Longitud de la línea que limita la cuenca hidrográfica.
Longitud axial (Lm)	km	Distancia entre la desembocadura y el punto más lejano de la divisoria de aguas de la cuenca.
Ancho máximo (l)	km	Distancia entre los puntos más alejados de la cuenca medidos perpendicular a la longitud axial.
Vertiente mayor (Amax) y menor (Amen)	km ²	Áreas de drenaje de la cuenca separadas por el cauce principal.
Longitud de las curvas de nivel (Lc)	km	Sumatoria de las longitudes de las líneas que unen puntos de igual altura topográfica.
Longitud del	km	Distancia medida desde el punto más distante del



cauce principal (L)		curso colector de la cuenca hasta la desembocadura.
Longitud total de la Red (ΣL_i)	km	Sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en una cuenca determinada.
Altura máxima (Hmax) y mínima (Hmin) del Cauce Principal.	m.s.n.m.	Cota del punto más elevado y del punto más bajo del cauce principal.

Nota: en base a Reyes-Trujillo, Barroso y Caravajal-Escobar (2010); Gaspari (2012); Camino et al. (2018).

La delimitación de la cuenca hidrográfica y la extracción de la red de drenaje se realiza mediante el software GRASS GIS 7.4.2., mientras que para la medición de las variables se utilizó el ArcMap Desktop 10.5.

3.1. Parámetros relativos a la forma de la cuenca

La forma de la cuenca es la configuración geométrica tal y como está proyectada en el plano horizontal (Llamas, 1993). Cada cuenca tiene una forma determinada que guarda estrecha relación con la manera en que se suministra el agua desde su nacimiento hasta su desembocadura, por lo que dos cuencas de igual área, pero con diferente forma, tendrán comportamientos hidrológicos diferentes (Mariscal Romero, et al, 2019, p. 40).

-Factor de forma (F):

$$F = \frac{A}{L_m^2}$$

Propuesto por Horton (1932) relaciona el área de la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido (Méndez 2015), determina la forma redondeada o alargada de la cuenca, la cual genera tendencia hacia crecidas rápidas y muy intensas, o lentas y sostenidas.

Un valor de F superior a la unidad muestra una cuenca achatada o un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa que forma fácilmente grandes crecidas (Reyes-Trujillo, Barroso y Caravajal-Escobar, 2010).

-Índice de compacidad (Kc):

$$K_c = 0.28 x \left[\frac{P}{\sqrt{A}} \right]$$

Desarrollado por Gravelius (1914) relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área equivalente a la de la cuenca (Cruz Romero et al 2015).

Cuanto mayor es el coeficiente, más distante será la forma de la cuenca con respecto al círculo. Valores cercanos a 1 indican que la cuenca presenta mayor tendencia a crecientes o concentración de altos volúmenes de agua de escorrentía (Sellers, Corbelle, Buján y Miranda, 2015).

-Índice de alargamiento (Ia):

$$l_a = \frac{L_m}{l}$$

Este índice, propuesto por Horton (1945), relaciona la longitud axial de la cuenca con su ancho máximo.

Las cuencas que presentan valores mayores a 1 tienen un área más larga que ancha, y permite predecir la dinámica del movimiento del agua en los drenajes y su potencia erosiva (Salas Aguilar et al, 2011).

-Índice asimétrico (I_{as}):

$$I_{as} = \frac{A_{may}}{A_{men}}$$

Este índice evalúa la homogeneidad en la distribución del drenaje, relaciona las áreas de las vertientes mayor y menor (Cruz Romero et ál., 2015).

Si el índice da como resultado un valor mucho mayor a 1 el río está más recargado sobre una de las vertientes (Reyes-Trujillo *et al.*, 2010).

En la Tabla 2 se presenta un cuadro resumen con los datos obtenidos.

Tabla 2

Interpretación de parámetros de forma

Parámetro	Interpretación
Factor de Forma	$F > 1$: Cuenca Achatada = Tendencia a ocurrencia de avenidas. $F < 1$: Cuenca Alargadas = Baja susceptibilidad a Avenidas.
Índice de Compacidad	$K_c = 1,00 - 1,25$: Cuenca redonda a Oval Redonda. $K_c = 1,25 - 1,50$: Cuenca Oval Redonda s Oval Oblonga. $K_c = 1,50 - 1,75$: Cuenca Oval Oblonga a Rectangular Oblonga.
Índice de Alargamiento	$I_a > 1$: Cuenca Alargada. $I_a = 1$: Cuenca Achatada y por lo tanto el cauce principal es corto.
Índice Asimétrico	$I_{as} > 1$: Cauce principal bastante recargado a una de las vertientes. $I_{as} = 1$: Distribución uniforme del Cauce principal

Nota: Reyes-Trujillo, et al., (2010); Gaspari (2012); Camino et al., 2018

3.2. La pendiente

-La pendiente media de la cuenca (S_m):

$$S_m = \frac{D \times L_c}{A}$$

La pendiente es la variación de la inclinación de una cuenca, y su importancia radica en la influencia que tiene sobre el comportamiento hidrológico, y sus consiguientes efectos

sobre la erosión y la sedimentación, y sobre la magnitud y el tiempo de formación de las crecientes (González de Matauco, 2004; Reyes-Trujillo, et al., 2010; Camino et al., 2018). Para estimar la pendiente media de una cuenca se propone una ecuación que relaciona la equidistancia (D) entre las curvas de nivel, el área y la sumatoria de las longitudes de todas las curvas de nivel que se encuentran dentro de la cuenca (Gaspari, 2012).

-Pendiente del cauce principal (S):

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \times 100$$

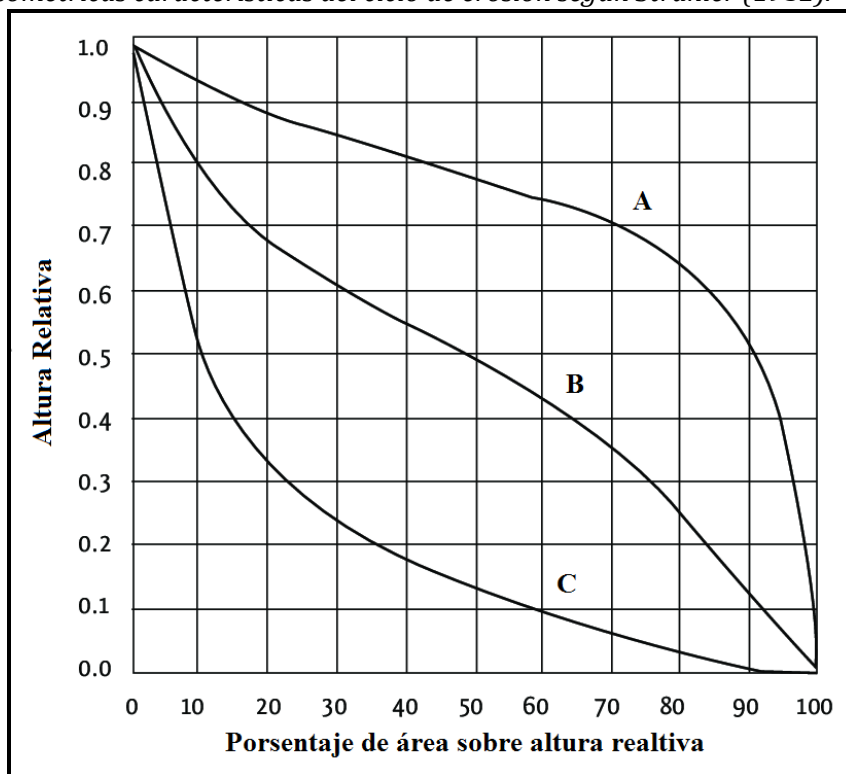
Este factor se relaciona directamente con la velocidad del flujo que discurre por el canal principal e inciden en la capacidad de transporte de sedimentos (Farfán et al., 2010). Se calcula y se determina el desnivel entre los puntos topográficos más alto y más bajo, y luego se divide por la longitud de cauce.

3.3. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es propuesta por Strahler (1952). Es un modelo que permite conocer la distribución de la masa desde arriba hacia abajo en relación con la altura y el área de la cuenca (Racca, 2007). (Figura 3)

Figura 3

Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión según Strahler (1952).



Leyenda: A) Cuenca con alto potencial erosivo (etapa juvenil); B) Cuenca en equilibrio (etapa de madurez); C) Cuenca sedimentaria (etapa de vejez).

Nota: Modificado por los autores en base a Salas Aguilar et al. (2011, p. 36)

La curva refleja con precisión el comportamiento global de la altitud de la cuenca y la dinámica del ciclo de erosión. A partir de la simple observación de las formas podemos inferir el grado de madurez de la cuenca o si existe algún control litológico que influye en el sistema hidrológico (Salas Aguilar et al., 2011).

3.4. Perfil longitudinal

Representa las diferentes elevaciones del fondo del arroyo desde el nacimiento hasta la desembocadura del río (Sellers et al., 2015). Evidencia de las particularidades del relieve de la cuenca a la que pertenece.

En su forma quedan registrados los efectos de la deformación de la corteza, cambios en el clima o procesos propios de la evolución del drenaje o capturas fluviales (Jiménez-Cantizano et al., 2017).

3.5. Densidad de drenaje

Es la relación entre la longitud total de los cauces de la cuenca y su área total. Indica el grado de desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca y su eficiencia (Horton 1945).

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Cuanto mayor sea el valor de la densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca ante una tormenta, por lo tanto, se evacúa el agua con mayor celeridad (Reyes-Trujillo et al., 2010; Gaspari, 2012), situación que se considera como un indicador de peligrosidad (Camino, et al, 2018)

3.6. Tiempo de concentración

Se define como el tiempo en el cual la escorrentía superficial del punto más alejado de la cuenca alcanza el punto de salida, es decir el tiempo en el cual toda la cuenca contribuye al flujo (Vélez Upegui y Botero Gutiérrez, 2011).

Varios autores proponen diversas fórmulas para determinar el tiempo de concentración en cuencas hidrográficas. Una de las más extendidas es la propuesta por Kirpich (1940), que calcula el T_c en minutos y la relaciona con la longitud del cauce principal y su pendiente media.

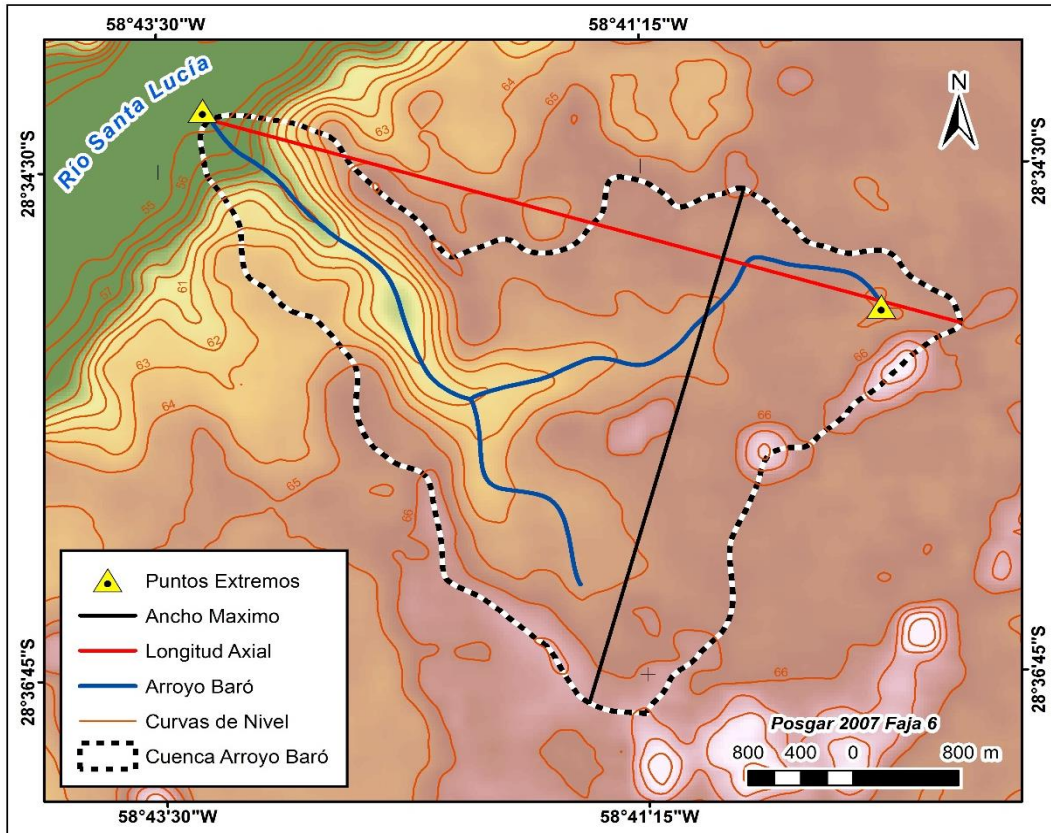
$$T_c = \frac{0,01947 \times L^{0,77}}{S^{0,385}}$$

Es un parámetro que recibe la influencia de las características de la forma, el relieve y la red de drenaje de la cuenca (Gaspari, 2012; Camino et al., 2018; Aumassanne et al., 2018; Mariscal Romero et al., 2019).

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de las variables de medición directa indican que la cuenca del arroyo Baró tiene una superficie de 13,05 km², definiéndose como una Microcuenca (Camino et al. 2018, Campos Aranda, 1992). Además, exhibe un perímetro de 17,98 km, 5,94 km de longitud axial, 4,37 km de ancho máximo, 8,73 km² de vertiente mayor, 4,32 km² de vertiente menor (Figura 4).

Figura 4
 Parámetros de medición directa.



Nota: Elaboración propia

La longitud de curvas de nivel es de 56,19 km, la equidistancia de 1 m, la longitud de cauce principal 6,97 km, la longitud total de la red 8,90 km, mientras que las alturas máximas y mínimas del cauce principal son 64,96 y 54,5 m.s.n.m. respectivamente.

El factor de forma arrojó un valor de 0,37, lo que indica una cuenca bastante alargada con baja susceptibilidad de crecidas repentinas (Tabla 3).

Tabla 3
 Parámetros de forma

Parámetro	Resultado (Índices adimensionales)
Factor de Forma	0,37
Índice de Compacidad	1,39
Índice de Alargamiento	1,36
Índice Asimétrico	2,02

Nota: Elaboración propia

Por su parte, el cálculo del índice de compacidad dio como resultado 1,39, que indica una forma oval redonda a oval oblonga, con tendencia media a la concentración de grandes volúmenes de agua. El valor de 1,36 de índice de alargamiento muestra una cuenca con un área poco alargada y predice un drenaje algo lento y con escasa potencia erosiva y de arrastre (Moreno Grande y Esquivel Jiménez, 2015)

El índice asimétrico muestra que la cuenca se encuentra recargada sobre la margen de mayor área. Esto se percibe al observar el único afluente que tiene el arroyo el cual proviene de la margen izquierda.

En general las cuencas que presentan valores similares a los que exhibe la cuenca del arroyo Baró, tienden a mostrar hidrogramas intermedios, sin picos muy fuertes, pero tampoco tan difusos. (Campo, Aldular, Fernández, 2011).

La pendiente media de la cuenca es de 0,43%, mientras que la pendiente del cauce principal es 0,15%. Esto quiere decir que el arroyo transita por un terreno muy plano (Ortiz, 2004), por lo tanto, denota erosión baja y baja capacidad de carga de sedimentos (Silva, 2003) (Tabla 4).

Tabla 4
Clasificación de pendientes medias.

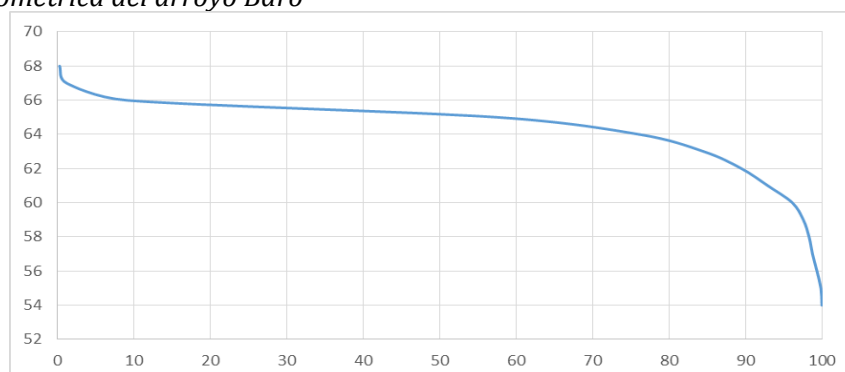
Pendiente (%)	Tipo de relieve
0-3	Plano
3-7	Suave
7-12	Mediano
12-35	Accidentado
35-50	Fuerte
50-75	Muy Fuerte
>75	Escarpado

Nota: Ortiz Vera (2004)

La curva hipsométrica evidencia un relieve en etapa de juventud con alto potencial erosivo (Figura 4). Se observa una pequeña pendiente al inicio de la curva, estabilizándose alrededor de los 66 m en la que comienza una zona plana sobre la cual se desarrolla la gran mayoría de la cuenca.

A partir de los 64 m y hasta la desembocadura es posible advertir un aumento progresivo de la pendiente. Este comportamiento también se refleja en la forma convexa del perfil longitudinal, con la única diferencia en la parte final de la curva, en la que se observa un área plana coincidente con el área urbana (Figura 5).

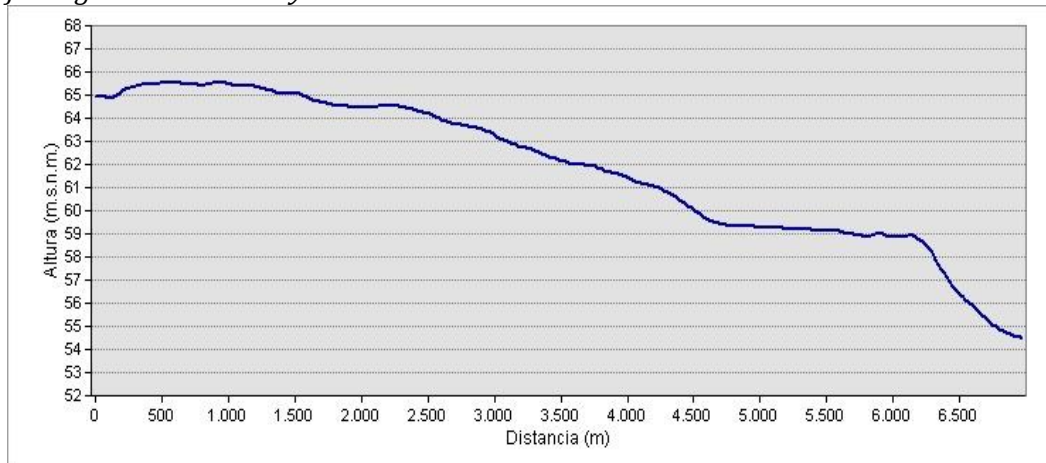
Figura 5
Curva hipsométrica del arroyo Baró



Nota: Elaboración propia

Las zonas de mayor pendiente coinciden con las áreas urbanizadas, por lo tanto, se genera mayor energía potencial en el flujo de agua y, en consecuencia, determina riesgos asociados a erosión y deslizamientos. (Verdugo Cárdenas, 2017)

Figura 6
Perfil longitudinal del arroyo Baró



Nota: Elaboración propia.

El valor de 0,68 de densidad de drenaje muestra una cuenca pobremente drenada. El agua retarda la salida y disminuye los picos de caudales en los hidrogramas (Cruz Romero et al., 2015). El tiempo de concentración es de 3 horas con 35 minutos, un valor alto en comparación con los tiempos de concentración de microcuencas (Méndez Mata, Córdova, Cartaya Ríos, 2005). Esto se produce, porque la zona en la cual se asienta la cuenca es una antigua llanura aluvial muy plana y, por lo tanto, retarda la respuesta ante las precipitaciones.

4.1. Visita al área de Estudio.

Durante la visita al área de estudio fue posible advertir una serie de obras de canalización realizadas dentro del área urbana. El arroyo Baró fue rectificado (Figura 7) y los terrenos que antes eran ocupados por el agua, hoy se encuentran con asentamiento de familias o en construcción (Foto 1 y 2).

Figura 7
Fotos e imagen satelital de rectificación del cauce





Leyenda: Foto 1. Cauce Natural; Foto 2. Cauce Rectificado.

Nota: Foto 1 y 2 tomadas durante trabajo de campo

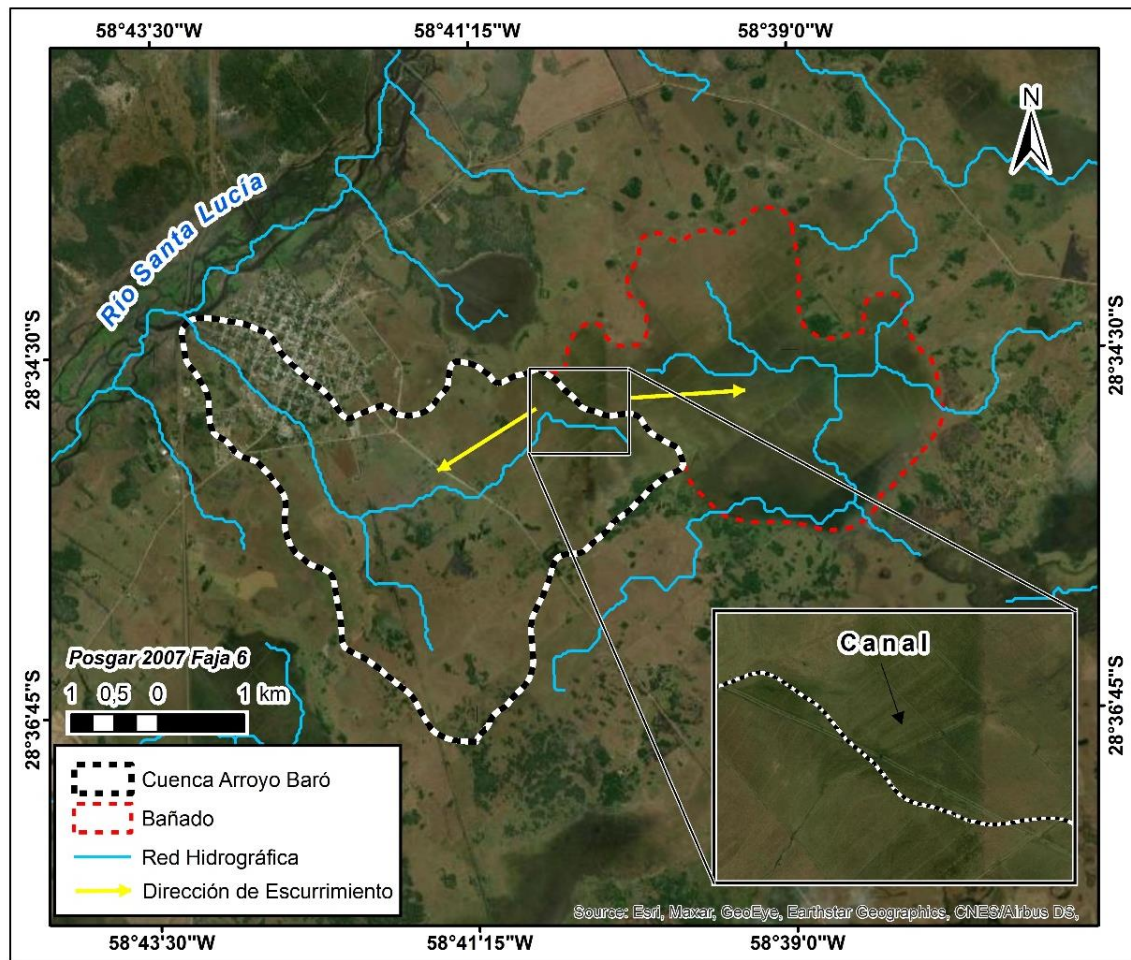
En la Figura 7, en la fotografía 1 podemos ver una depresión que marca el cauce natural del arroyo Baró anterior a la rectificación del curso realizada en el año 2005. Estos son terrenos bajos con depresión en comparación con los circundantes y por lo tanto susceptibles a anegamientos regulares, y, aun así, se perciben construcciones dentro del área.

En la misma Figura 7, en la foto 2 se observa el cauce rectificado y la presencia de una edificación al fondo, la cual se encuentra en un área de sumo peligro entre el cauce natural y el cauce rectificado.

En el año 2005 se hizo una modificación del cauce natural del arroyo, el lugar dejó de ser parte del curso de agua. Fue dividido en dos partes, una fue donada a los bomberos voluntarios y la otra a un ciudadano. Esta persona actualmente construye cabañas de fines de semana en lugares que son inundables. El agua llegó hasta el límite de propiedad de los bomberos alguna vez, por lo tanto, es una locura que se permita construir allí. En mi opinión el municipio no debía donar el terreno a esa persona. (Reproducción textual: Roque Ferreira, Ex-Jefe de Bomberos Voluntarios de San Roque)

Por último, a través de análisis de imágenes satelitales y de modelos de elevación digital, se constata una serie de obras de canalizaciones para drenaje de bañados que conducen agua hacia el arroyo Baró desde cuencas aledañas (Figura 8).

Figura 8
Red de escurrimiento y canal conector entre distintas cuencas



Nota: Elaboración propia

Sin dudas que esta modificación antrópica genera un aumento de la superficie de captación de la cuenca y, en consecuencia, un desequilibrio entre el volumen de agua disponible y el volumen que soporta el canal colector, pudiéndose generar grandes desbordes. En este sentido, la rectificación de los cursos y la canalización constituyen los factores que incrementan la velocidad del flujo, originan una concentración más rápida de la escorrentía y un flujo turbulento más potente que erosiona más rápido las márgenes del arroyo (Vidal y Romero, 2010; Marroquín, 2017, Matteucci et al 2007).

5. Conclusiones

La localidad de San Roque se ubica en una posición geográfica expuesta a riesgos por inundación casi constantes, como sucedió en los años 2017 y 2019 con una precipitación acumulada de 452 mm solo en los meses abril y mayo y de 328,5 mm en el mes de enero respectivamente. A causa de esto, el arroyo crece repentinamente, se desborda, afecta a las familias de la localidad y se procede a evacuar a más de 750 personas de sus hogares. En los últimos años, el riesgo por inundación se manifiesta de manera recurrente, afecta a muchas personas que viven en áreas aledañas tanto de río Santa Lucía, como del arroyo



Baró. Los análisis morfométricos posibilitan tener una idea general de la respuesta hidrológica que tendría una cuenca hidrográfica ante eventos de precipitación intensos. A su vez, es posible obtener datos precisos de forma rápida y continua, y con relativamente poco tiempo de procesamiento gracias a las facilidades que proveen en el presente las tecnologías geoespaciales.

Los resultados obtenidos evidencian que se trata de una cuenca joven de forma alargada y con pendientes muy bajas, por lo tanto, las probabilidades de crecidas repentinas son bajas. Los tiempos de recorrido del agua son altos en relación con el área de la cuenca y el drenaje es pobre, lo que retarda la descarga y achata los picos de los hidrogramas de salida. Sin embargo, al tratarse de una cuenca muy reducida en tamaño, la respuesta de los niveles hidrométricos será relativamente inmediatos. Para que las crecidas repentinas ocurran se tiene que dar una serie de acontecimientos, que son precipitaciones de más de 100 mm en pocas horas y, que el río Santa Lucía esté alto, o sea a partir de unos 3 m aproximadamente. Esto demuestra que son eventos recurrentes, como se menciona anteriormente, en muchos casos se vincula con una deficiente gestión o planificación urbana.

Por otro lado, las intervenciones humanas sobre sistemas naturales que evolucionan durante cientos o miles de años responden a las condiciones ambientales determinadas (por más mínimas que estas sean) originan desequilibrios en estos sistemas de los cuales se desconoce las consecuencias e influyen y aumentan los niveles de riesgo para poblaciones enteras.

Es por ello, que una buena gestión de los recursos naturales implica el conocimiento funcional del paisaje, principalmente aquellas variables ambientales que intervienen e influyen para mitigar o potenciar la amenaza por inundación, a fin de preservar tanto la salud ambiental como a la población y sus bienes materiales.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos PICT 2018- 636; PI 19Q001 y 20Q002 de la Secretaría General de Ciencia y Técnica – UNNE. Por otra parte, se agradece a la Lic. Nadia Kowacki y al Lic. Juan Skrbec de INNOVAT por su gestión para adquirir el equipo Drone con el que se realizó este trabajo.

7. Referencias bibliográficas

- Aguirre, N. (2007). *Manual para el Manejo Sustentable de Cuencas Hidrográficas*. Universidad Nacional de Loja. Loja-Ecuador.
- Aumassane, C. M.; Gaspari, F. J.; Bege, M. E.; Sartor, P. D.; Oricchio, P.; y Di Bella, C. M. (2018). "Morfometría de la cuenca alta del río Colorado, Argentina". *Boletín geográfico*. 40, 1, pp. 13-29.
- Bonetto, A.; Roldán, D.; y Oliver, M. (1978). "Estudios limnológicos en la cuenca del Riachuelo. Poblaciones de peces en ambientes leníticos y lácticos". *Ecosur*. 5, 9, pp. 1-15.
- Camino, M. A.; Bó, M. J.; Cionchi, J. L.; López de Armentia, A.; Del Río, J. L.; y De Marco, S. G. (2018). "Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina)". *Revista Universitaria de Geografía*. 27, 1, pp. 73-97.



- Campo, A. M.; Aldalur, N. B.; y Fernández, S. N. (2012). "Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina". *Investigaciones Geográficas*. 77, pp. 7-17.
- Campos Aranda, D. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Contreras, F. I.; y Fantín, M. A. (2015). "El riesgo de la población a inundaciones por lluvias como consecuencia de la dinámica de expansión urbana sobre paisajes anegadizos. El caso de la ciudad de Corrientes (Argentina)". *Folia Histórica del Nordeste*. 23, pp. 97-112.
- Contreras, F. I.; y Odriozola, M. P. (2016). "Aplicación de Modelos de Elevación Digital para la delimitación de áreas de riesgo por inundaciones. San Luis del Palmar, Corrientes, Rca. Argentina". *Contribuciones Científicas GAEA*. 28, pp. 83-94.
- Cruz Romero, B.; Gaspari, F. J.; Rodríguez Vagaría, A. M.; Carrillo González, F. M.; y Téllez López, J. (2015). "Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México." *Investigación y Ciencia*. 23, 64, pp. 26-34.
- del Río San José, J. (2010). *Introducción al tratamiento de datos espaciales en hidrología*. Madrid: Bubok
- Encinas (22/07/2016). "Dragado, defensas y desagües pluviales, obras que urgen para evitar inundaciones". Diario *El Litoral de Corrientes*. Recuperado de: <http://www.ellitoral.com.ar/301956/Dragado-defensas-y-desagües-pluviales-obras-que-urgen-para-evitar-inundaciones-acceso-10/03/2016>
- Farfán, F.; Urbina, L.; Ferreira, S.; y Brandan, M. (2010). "Caracterización y red de drenaje de la subcuenca del río Tin-Tin, PN Los Cardones, Salta." *Revista Científica de Educación*. 5, 16, pp. 7-21.
- Felicísimo, Á. (1999). *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales*. Biblioteca de Historia Natural, 3. Pentalfa Ediciones, Oviedo
- Fuentes-Junco, J. J. A. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro*. México: Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Gaspari, F. J.; Rodríguez Vagaría, A. M.; Senisterra, G. E.; Denegri, G.; Delgado, M. I.; y Besteiro, S. (2012). "Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina." *AUGM DOMUS*. 4, pp.143-158.
- González de Matauco Askoa, I. (2004). "Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas". *Boletín de la Asociación de Geógrafos españoles*. 38, pp. 311-329.
- Gravelius, H. (1914). *Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Compendium of Hydrology*. Berlín: Goschen.
- Horton, R. E. (1932). "Drainage-basin characteristics". *Transactions*. 13, 1, pp. 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.
- Jiménez-Cantizano, F.; Antón, L.; Soria-Jáuregui, A., y Pastor-Martín, C. (2017). "Cálculo del perfil teórico de equilibrio de un río en función del índice de gradiente." *Geogaceta*. 62, pp.51-54.
- Kirpich, P. Z. (1940). "Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds". *Civil Engineering*. 10, 6, pp. 362.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general: principios y aplicaciones*. Bilbao: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- Maidment, D. R. (1992). *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill.



- Mariscal-Romero, J.; Chávez-González, T. R.; y Arciniega-Flores, J. (2019). "Caracterización hidrográfica de las cuencas de la Bahía de Navidad, Jalisco, México." *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 27, 77, pp. 38-46.
- Marroquín, M. G. (2017). *Impacto de la canalización del Río Vado Ancho sobre la cuenca baja, Laguna Panzacola y la pesquería*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable con orientación en Manejo y Conservación de Recursos Naturales. Colegio de la Frontera Sur. Tapachula. Chiapas. México. Recuperado de: <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-retrieve-file.pl?id=ddf89e19c903495b47b361ce4fa3822d>
- Matteucci, S. D.; Herrera, P.; Miñarro, F.; Adámoli, J.; Torrela, S.; Ginzburg, R.; y Naturales, U. B. A. (2007). *Herramientas de toma de decisiones en la zonificación para el uso sustentable en los humedales del sudeste de la región chaqueña*. In Memorias XII Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica. Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (SIBSIG). Universidad Nacional de Luján. pp. 1-25.
- Moreno Grande, F. A.; y Esquivel Jiménez, J. R. (2015). *Estudio morfométrico de la Cuenca del Río Azul, afluente del Río Calima, Departamento del Valle del Cauca*.
- Moretto, B.; Gentili, J. O.; y Campo, A. M. (2019). "Análisis morfométrico multiescalar en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina)". *Revista Huellas*. 23, 2, pp. 149-167
- Neiff, J.; y Malvárez, A. (2004). "Grandes Humedales fluviales". Malvárez, A y Bó, F. (Eds.) *Bases ecológicas para la clasificación e inventario de humedales en Argentina*. Talleres Gráficos Leograf S.R.L. pp. 77 – 88.
- Orfeo, O. (2005). "Historia geológica del Iberá, provincia de Corrientes, como escenario de biodiversidad". *Miscelánea*. 14, pp. 72.
- Pissara, T. C. T.; Politano, W.; y Ferraudó, A. S. (2004). "Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico, Jaboticabal (SP)". *Rev. Bras. Ciências do Solo, Viçosa*. 28, pp. 297-305.
- Poi, A.; y Galassi, M. (2013). "Humedales del noroeste de Corrientes". En: Benzaquén, L.; Blanco, D.; Bó, R.; Kandus, P.; Lingua, G.; Minotti, O.; Quintana, R.; Sverlij, S. y Vidal, L. (Eds.). *Inventario de Humedales de Argentina: Sistemas de paisajes de humedales del Corredor Fluvial Paraná – Paraguay*. Pp. 215–221.
- Popolizio, E. (1986). "Influencia del sistema geomorfológico en las crecientes e inundaciones del nordeste argentino". *Geociencias*. 14.
- Pyszczyk, O. (2016). "Condiciones atmosféricas y clasificación climática del espacio geográfico correntino". En Contreras FI., y Odrizola, MP. *Libro de la Junta de Geografía 2016*. Pp. 6 – 17.
- Racca, J. M. G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*. 77,1-2, pp. 31-38.
- Reyes-Trujillo, A.; Barroso, F. U.; y Carvajal Escobar, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Programa Editorial Universidad del Valle. Cali. Colombia.
- Salas Salinas, M. A.; y Jiménez Espinosa, M. (2004). *Inundaciones*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
- Salas-Aguilar, V. M.; Pinedo-Álvarez, C.; Viramontes-Olivas, O. A.; Báez-González, A. D.; y Quintana-Martínez Rey M. (2011). "Morfometría de la cuenca del río Nazas Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial." *Tecnociencia Chihuahua*. 5, 1, pp. 34-42.



- Schumm Stanley, A. (1956). "Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Anboy, New Jersey". *Bulletin of the Geological Society of America*. 67, pp. 597-646.
- Sellers, C.; Corbelle, E.; Buján, S.; y Miranda, D. (2015). "Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador". *IERSE*. 30, pp. 131-180.
- Strahler, A. N. (1952). "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topograph." *Bulletin of the Geological Society of America*. 63, pp. 1117-1142.
- Teodoro, V. L. I.; Teixeira, D.; Costa, D. J. L.; y Fuller, B. B. (2007). O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. *Revista Brasileira Multidisciplinar*. 11, 1, pp. 137-156.
- Tucci, C. E. M. (1997). Regionalização de vazões. 2º ed. En *Hidrología: Ciência e Aplicação*. Tucci, C. (Org). ABRH, Porto Alegre. pp. 573-620.
- United States Geological Survey (USGS). (1998). *Standards for digital elevation models*. 410 p. National Mapping Program-EE.UU.
- Vélez Upegui, J. J.; y Gutiérrez, A. B. (2011). "Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales". *Dyna*. 78, 165, pp. 58-71.
- Verdugo Cárdenas, M. (2017). *Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico*. Tesis de Ingeniero Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. Sede Cuenca. Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14381/1/UPS-CT007051.pdf>
- Vidal, C.; y Romero, H. (2010). "Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Bío-bío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción". En Pérez, L. e Hidalgo, R. (Eds.). *Concepción metropolitano (AMC). Planes, procesos y proyectos*. Serie Geolibros, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/118084> acceso 10/03/2016
- Viramontes-Olivas, Ó. A.; Escoboza-García, L. F.; Álvarez, C. P.; Álvarez, A. P.; Reyes-Gómez, V. M.; y Pérez-Márquez, A. (2007). "Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua." *Tecnociencia Chihuahua*. 1,3, pp. 21-31.